



Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von nichtdurchströmten zellularen Metallen

Von der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt von **Dipl.-Ing. Valeria Skibina**

geboren am 18. Juli 1985 in Tashkent USSR

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Groß
Dr.-Ing. Jens Meinert

Tag der Verleihung: Freiberg, den 30. November 2012

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

- Prof. U. Groß; Dr. J. Meinert; Dr. R. Wulf (Auswahl und Auswertung des Materials)
- Dr. R. Wulf; G. Glöckner (sprachlich korrekte Anfertigung der Arbeit)

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt.

Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die nicht als solche kenntlich gemacht worden sind. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

30. November 2012

Dipl.-Ing. Valeria Skibina

Danksagung

Diese Seite möchte ich dazu nutzen, den Leuten zu danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Mein herzlicher Dank gilt:

- Herrn Prof. U. Groß für die Einladung zur Promotion, die Aufgabenstellung, die von ihm gewährte Freiheit in der Erstellung der Arbeit und die fachliche Unterstützung,
- Herrn Dr. J. Meinert für seine fachliche Diskussion, wertvollen Bemerkungen und Kommentare bei der Begutachtung der vorliegenden Arbeit,
- Frau Dr. R. Wulf für die fachliche und freundschaftliche Unterstützung, die zahlreichen konstruktiven Diskussionen, die zeitaufwändige Sprachkorrektur der Arbeit und die ständige Hilfsbereitschaft,
- Frau A. Mieke für die technische Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit im Textsatzsystem LaTeX,
- Frau Dr. A. Dög für das Korrekturlesen sowie für die mathematische und moralische Unterstützung,
- Herrn G. Glöckner für das Korrekturlesen der vorliegenden Arbeit,
- Herrn Dr. H. Wulf, Herrn J. Freitag und Herrn C. Degenkolb für die Hilfe bei der Formatierung der vorliegenden Arbeit in LaTeX,
- Frau A. Hegewald, Herrn A. Wahl und Herrn G. Mardaus für die professionelle Unterstützung beim Messaufbau und der Durchführung der anspruchsvollen Messungen,
- Frau T. Csomor und A. Graupner für die engagierte organisatorische Unterstützung,
- allen Mitarbeitern des Lehrstuhles für Technische Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg für die Hilfsbereitschaft und die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre,
- den Kooperationspartnern Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung Dresden, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und

Systeme Dresden, Firma Hollomet GmbH Dresden, Firma Composite Materials Ekaterinburg, Metallschaumzentrum Chemnitz Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Firma m.pore GmbH Dresden, Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik und Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Bergakademie Freiberg für die sehr gute Zusammenarbeit und

- dem Deutschen Akademischen Austauschdienst für die finanzielle Unterstützung.

Ganz besonders danken muss ich meinen Eltern für die liebevolle und moralische Unterstützung und dass sie mich stets bestärkt haben, wenn ich an mir gezweifelt habe. Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mich nicht nur tatkräftig unterstützt haben, sondern mich stets aufbauten und für die erforderliche Abwechslung sorgten.

Freiberg im Januar 2013

Valeria Skibina

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	8
1 Einleitung und Zielsetzung	12
2 Aufbau und Einteilung zellularer metallischer Strukturen	15
3 Grundlagen des Wärmetransportes in porösen metallischen Strukturen	19
3.1 Festkörperwärmeleitung	20
3.2 Wärmeleitung in der Gasphase	21
3.3 Konvektion	21
3.4 Wärmetransport durch Strahlung	22
3.5 Gesamtwärmetransport	25
4 Messung der Wärmeleitfähigkeit von Metallschäumen - Literaturanalyse	27
4.1 Untersuchte Materialien	28
4.2 Verwendete Messverfahren für die effektive Wärmeleitfähigkeit	29
4.3 Vergleich der Messergebnisse	35
4.3.1 Einfluss der Porosität (bei Raumtemperatur)	35
4.3.2 Einfluss der Temperatur	41
4.4 Mathematische Modelle	46
4.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung	49
5 Untersuchte Materialien	52
5.1 Hohlkugelstrukturen	52
5.1.1 Herstellung	53
5.1.2 Charakterisierung der Grundmaterialien	54
5.1.3 Strukturen und Strukturanalyse	54
5.2 Aufgeschäumte Strukturen	59
5.2.1 Herstellung	59
5.2.2 Charakterisierung des Grundmaterials	60
5.2.3 Strukturen und Strukturanalyse	60

5.3	Offenzellige Strukturen	61
5.3.1	Herstellung	61
5.3.2	Charakterisierung des Grundmaterials	63
5.3.3	Strukturen und Strukturanalyse	64
6	Eingesetzte Messapparaturen und Probenpräparation	68
6.1	Stationäre Messmethode - Plattenverfahren	68
6.2	Instationäre Messmethoden	71
6.2.1	TPS-Messverfahren	71
6.2.2	Laser-Flash-Verfahren	81
6.3	Aufgetretene Probleme bei der Durchführung der Messungen	82
6.3.1	TPS-Messverfahren	83
6.3.2	Laser-Flash-Verfahren	85
6.3.3	Plattenverfahren PMA2	86
7	Messergebnisse	89
7.1	Messungen bei Raumtemperatur	89
7.1.1	Geschlossenzellige Strukturen	90
7.1.2	Offenzellige Strukturen	93
7.1.3	Vergleich und Diskussion der Ergebnisse für offen- und geschlossenzellige Strukturen	97
7.2	Messungen bei höheren Temperaturen	101
7.2.1	Hohlkugelstrukturen	101
7.2.2	Offenzellige Strukturen	104
7.3	Wiederholpräzision und Messunsicherheit	107
7.3.1	TPS-Messverfahren	107
7.3.2	Laser-Flash-Messverfahren	108
7.3.3	Plattenverfahren PMA2	109
7.4	Vergleich mit Literaturwerten und mathematischen Modellen	111
7.4.1	Vergleich mit den Literaturwerten	111
7.4.2	Vergleich mit den mathematischen Modellen	113
8	Zusammenfassung und Ausblick	119
	Literatur	124
	Abbildungsverzeichnis	131
	Tabellenverzeichnis	137

A	Anhang	138
A.1	Datenblätter der Grundmaterialien	138
A.1.1	Grundmaterialien für Hohlkugelstrukturen	138
A.1.2	Grundmaterial für aufgeschäumte Strukturen	141
A.1.3	Grundmaterial für offenzellige Strukturen	141
A.2	Strukturanalyse	142
A.2.1	Bestimmung der Porendurchmesser von Hohlkugelstrukturen	142
A.2.2	Bestimmung der sekundären Porosität	147
A.2.3	Bestimmung der Stegdicke	149
A.2.4	Bestimmung der Stegfläche	159

Symbolverzeichnis

a	mm^2/s	Temperaturleitfähigkeit
c_p	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_v	$\text{J}/(\text{kg K})$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
d	mm	Durchmesser oder Dicke
$D(\tau)$	—	Funktion der dimensionslosen Zeit
E	%	prozentuale Porosität
Gr	—	Grashof-Zahl
I_0	—	modifizierte Bessel-Funktion erster Gattung 0-ter Ordnung
k	—	Elektronenwellenzahl
K	$1/\text{m}$	Extinktionskoeffizient
K^*	$1/\text{m}$	Gesamtextinktionskoeffizient
Kn	—	Knudsenzahl
l_p	mm	mittlere freie Weglänge der Photonen
m	kg	Masse
n	—	Anzahl der Spiralen im Sensor
p	Pa	Druck
P_0	W	Heizleistung
\dot{q}	W/m^2	Wärmestromdichte
\dot{Q}	W	Wärmestrom
R	mm	Radius des Sensors
$R_0; R_{el}$	Ω	elektrische Widerstände
s	mm	Schichtdicke
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
\bar{T}	K	mittlere Temperatur
V	m^3	Volumen
\bar{w}	m/s	mittlere Geschwindigkeit der Gasmoleküle
x, y, z	m	räumliche Koordinaten

α	1/K	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes
β	—	Strahlungsaustauschgrad
β_a	—	Sensitivitätskoeffizient der Temperaturleitfähigkeit
β_λ	—	Sensitivitätskoeffizient der Wärmeleitfähigkeit
β_G	1/K	Wärmeausdehnungskoeffizient des Gases
Δp	mm	Wärmeeindringtiefe
ΔT	K	Temperaturdifferenz
$\Delta \bar{T}$	K	mittlere Temperaturerhöhung
ε	—	Porosität
η	Pa s	dynamische Viskosität
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
Λ	mm	mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle
ρ	kg/m ³	Dichte
σ	—	Integrationsvariable
τ	—	dimensionslose Zeit
τ_0	—	optische Dicke

Indices

<i>eff</i>	effektiv
<i>F</i>	Feststoff
<i>G</i>	Gas
<i>H</i>	Hohlraum
<i>HKS</i>	Hohlkugelstruktur
<i>K</i>	Kugel
<i>Knoten</i>	Knoten
<i>Kon</i>	Konvektion
<i>L</i>	Leitung
<i>por</i>	Pore
<i>pr</i>	primäre
<i>Probe</i>	Probe
<i>Ref</i>	Referenz
<i>Schicht</i>	Schicht
<i>sek</i>	sekundäre
<i>steg</i>	Steg

<i>Str</i>	Strahlung
<i>wand</i>	Wand
<i>zell</i>	zellulare Struktur
\perp	Reihenschaltung
\parallel	Parallelschaltung

Konstanten

g	Fallbeschleunigung	$9,81 \text{ m/s}^2$
σ_{Str}	Stefan-Boltzmann-Konstante	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$
e	Elementarladung	$1,602176565 \cdot 10^{-19}$
L	Lorenz-Zahl	$2,1...2,9 \cdot 10^{-8} \text{ W } \Omega / \text{K}^2$

Abkürzungen

o	offenzellige
g	geschlossenenzellige
f	Faserstruktur
h	Hohlkugelstruktur
CL	Comparative Longitudinal
GHP	Guarded-Hot-Plate
HFM	Heat Flow Meter
HW	Hot-Wire
LFA	Laser-Flash-Apparatur
MH	Monotonic Heating
P	Plate
PC	Plate-Comparative
PMA2	Plattenmessapparatur 2
PT	Photo-Thermal
TPS	Transient-Plane-Source-Technique

GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
Leg	Legierung
PU	Polyurethanschaum
CM	Firma Composite Materials Ekaterinburg
HO	Firma Hollomet GmbH Dresden
IWU	Metallschaumzentrum Chemnitz Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
IFAM	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung Dresden
MP	Firma m.pore GmbH Dresden
IWTT	Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik
IKGB	Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik
IWW	Institut für Werkstoffwissenschaft
IKTS	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme Dresden
TU BAF	Technische Universität Bergakademie Freiberg

Parameter in mathematischen Modellen

a^*	Wiener-Modell [85]
B, C_f, k, N, γ	Zehner-Bauer-Schlünder-Modell [65]
ϕ	Maxwell-Modell [47]
C_0, C_1, C_2, C_3	Zhao-Strahlungsmodell [88]
X	Korrigiertes Modell von Meinert [48]

1 Einleitung und Zielsetzung

Die zellularen metallischen Strukturen gehören zu den zur Zeit stark in Entwicklung befindlichen Materialien. Die Ursache dafür sind die attraktiven Eigenschaften dieser Werkstoffe. Die hohe Porosität, die niedrige relative Dichte, die hohe Wärmeleitfähigkeit der Zellen, die hohe Temperaturbeständigkeit, die große spezifische Oberfläche - alle diese Besonderheiten begründen die Anwendung dieser Werkstoffe in vielen verschiedenen Bereichen, die z. B. von *Vicente u. a. [82]* genannt wurden. Dabei haben die Metallschäume besondere mechanische Eigenschaften, wie z. B. hohe Festigkeit, chemische Beständigkeit, Energiespeicherfähigkeit und schallschluckende Beschaffenheit. Metallschäume finden eine breite Anwendung in zahlreichen Industriezweigen. Ausführlich beschreiben *Banhart [8]* und *Degischer und Kriszt [24]* die Anwendungsgebiete von Metallschäumen. Man unterscheidet zwei Arten der Anwendung: strukturelle und funktionelle.

Die Metallschäume mit geschlossener Porosität (g) dienen in den meisten Fällen der strukturellen Anwendung. Sie werden im Maschinen- und Apparatebau, im Fahrzeug-, Bahn- und Schiffsbau, in der Weltraumtechnik, im Bauwesen, für Sportausrüstung und im medizinisch-biologischen Bereich verwendet. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Werkstoffe für diese Gebiete sind geringe Dichte, Schalldämmung, Wärmedämmung, Schwingungsdämpfung und Biokompatibilität. Funktionell nutzt man im Allgemeinen Metallschäume mit offener Porosität (o) in folgenden Bereichen: in Wärmeübertragern, bei der Filtrierung und Separation, als Einbauten in Katalysatoren, zur Kontrolle von Flüssigkeitsströmungen, in Schalldämpfern, zur Verbesserung der Kinetik von Wärmespeichern (*Meinert u. a. [49]*), in Batterieelektroden, Brennern und bei elektrochemischen Anwendungen. Weitere Einsatzgebiete sind Anlagen zur Aufbereitung von Wasser, akustische Überwachung, Dekoration und Kunst. Für funktionelle Anwendungen spielen Eigenschaften wie hohe Porosität, gute Filtrationsfähigkeit, Durchlässigkeit für Partikel, Korrosionsbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit, große Oberfläche, große Speicherkapazität und Feuerunsicherheit von Metallschäumen eine wichtige Rolle (*Banhart [8]*). Die thermophysikalischen Eigenschaften der Metallschäume spielen in folgenden Anwendungsgebieten eine bedeutende Rolle: Wärmedämmung bei hohen Temperaturen, Wärmeübertrager und Wärmeregeneratoren. Dabei muss man die thermophysikalischen Eigenschaften immer im Zu-

sammenhang mit anderen Eigenschaften betrachten, wie extrem große innere Oberfläche, Unempfindlichkeit gegenüber Wasser, Bioverträglichkeit usw.

Einen besonderen Typ der zellularen metallischen Strukturen bilden Hohlkugelstrukturen, die als partiell geschlossenzellig (pg) bezeichnet werden können. Sie stellen eine Kombination von offener und geschlossener Porosität dar. Die derzeitigen Anwendungsgebiete sind Schallabsorption im Fahrzeug- und Maschinenbau, Hitzeschutz, Absorption mechanischer und thermischer Energie sowie Leichtbaustrukturen, die ausführlich bei *Waag u. a. [84]* beschrieben werden. Dabei befinden sich die Anwendungsmöglichkeiten dieser Materialien stark in der Untersuchungsphase.

Für den optimalen Einsatz der zellularen metallischen Strukturen sind genaue Kenntnisse der Eigenschaften eine wichtige Voraussetzung. Eine wesentliche thermophysikalische Eigenschaft ist die effektive Wärmeleitfähigkeit, die bei solchen Materialien von verschiedenen Wärmetransportprozessen beeinflusst wird. Außerdem besitzen die zellularen metallischen Strukturen eine komplexe Geometrie. Aus diesem Grund ist die experimentelle Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit sehr kompliziert. Bisher wurden verschiedene Messverfahren eingesetzt, die sich im Messprinzip, im apparativen Aufwand und in der Messunsicherheit stark unterscheiden. Beim Vergleich der Messergebnisse, die in der Literatur vorhanden sind, bilden die Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit eine breite Palette. Die Wirkung von solchen Einflussparametern, wie Strukturtyp und strukturelle Eigenschaften sind dabei schon bei Raumtemperatur nicht klar zu erkennen. Außerdem ist es nicht möglich nachvollzuziehen, wie sich die effektive Wärmeleitfähigkeit bei Metallschäumen in Abhängigkeit von der Temperatur entwickelt. Bei zahlreichen Messungen, die in der Literatur dargestellt sind, wird nicht erläutert, mit welchen Problemen die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit verbunden ist. Weiterhin gibt es bisher keine gezielten Untersuchungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit von zellularen Strukturen verschiedenen Typs mit unterschiedlichen Messapparaturen. Empfehlungen für eine optimale Durchführung von Messungen sind ebenfalls nicht vorhanden.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die unterschiedlichen zellularen Strukturen mit verschiedenen Messapparaturen zu untersuchen und die Abhängigkeit der effektiven Wärmeleitfähigkeit vom Typ der Struktur und von der Temperatur zu erkennen. Es wurden drei Typen der Struktur (offenzellige, partiell geschlossenzellige und geschlossenzellige) mit luftgefüllten Poren unter Umgebungsdruck untersucht, die unterschiedliche Struktureigenschaften besitzen. Zur besseren Interpretation der Ergebnisse wurden die Struktureigenschaften mit verschiedenen Techniken untersucht. Die eingesetzten Messapparaturen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit unterscheiden sich im Messprinzip, im Messaufbau, der Probenpräparation und der Messunsicherheit. Die Untersuchungen wurden bis

maximal 800 °C durchgeführt. Dabei wurden die Probleme bei der Messdurchführung analysiert und Empfehlungen für die optimale Durchführung zukünftiger Messungen herausgearbeitet.

Zusammenfassend wurden die Messergebnisse aller eingesetzten Methoden miteinander verglichen und unter Einbeziehung der ermittelten Strukturdaten bewertet. Weiterhin wurden die eigenen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit Literaturwerten verglichen, um die Daten in das Gesamtbild aller bisher gewonnenen Messwerte einzuordnen. Außerdem wurde die Anpassung von in der Literatur vorhandenen mathematischen Modellen an die Messergebnisse geprüft.

2 Aufbau und Einteilung zellularer metallischer Strukturen

Zellulare metallische Strukturen sind Werkstoffe mit besonderen Eigenschaften, welche *Sosnik [74]* im Jahr 1943 zum ersten Mal durch ein patentiertes Aufschäumverfahren herstellte. Die Herstellungsmethoden unterteilen sich in Flüssigmetallurgie, Beschichtungsverfahren und Pulvermetallurgie. *Degischer und Kriszt [24]* präsentieren einen Überblick der existierenden Herstellungsmethoden solcher Strukturen.

Die Besonderheit aller zellularen Werkstoffe besteht neben ihrer porösen Struktur in der Existenz von (nahezu) identischen geometrisch definierbaren Zellen. Die existierenden zellularen metallischen Werkstoffe unterteilen sich in offenzellige, geschlossenzellige, partiell geschlossenzellige Hohlkugelstrukturen, faserverbundene, sandwichverbundene und Drahtstrukturen, die von *Neugebauer u. a. [52]* allgemein beschrieben werden.

Die Abbildung 2.1 präsentiert Beispiele solcher Strukturen, wie sie in dieser Arbeit untersucht wurden.

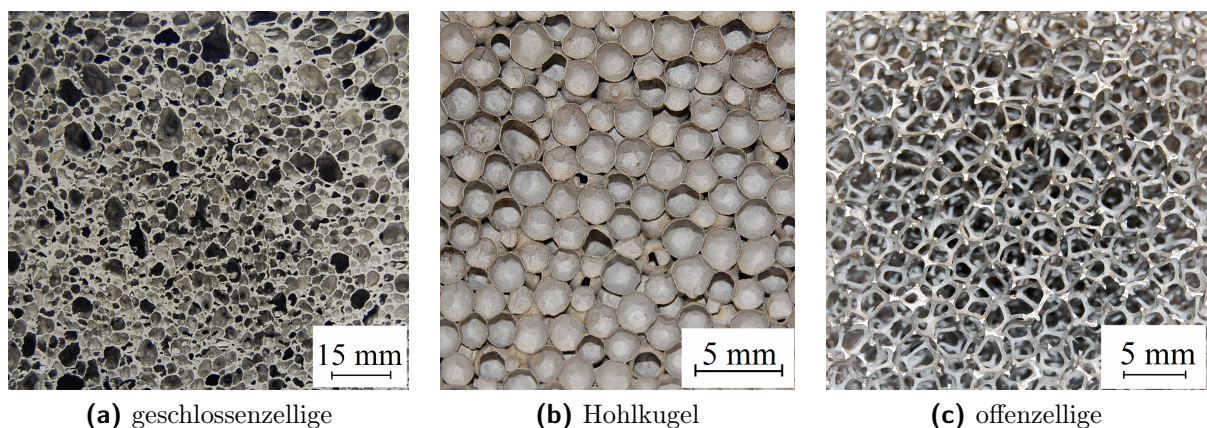


Abb. 2.1: Fotoaufnahmen der untersuchten Metallschäume

Der wichtigste Parameter der Strukturcharakterisierung ist nach *Gibson und Ashby [27]* die relative Dichte $\rho_{\text{zell}}/\rho_F$. Dabei ist ρ_{zell} die Dichte der zellularen Struktur und ρ_F die

Dichte des Grundmaterials. Der Anteil des Hohlraumvolumens der porösen Struktur ist die Gesamtporosität, die mit folgender Gleichung bestimmt wird:

$$\varepsilon = \frac{V_H}{V} = \frac{V_H}{V_H + V_F} \quad (2.1)$$

Dabei ist V_H das Hohlraumvolumen, V_F das Volumen des Feststoffes und V das Gesamtvolumen. Die Gesamtporosität lässt sich durch die relative Dichte definieren mit

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{zell}}{\rho_F} \quad (2.2)$$

oder als prozentuale Größe mit

$$E = \left(1 - \frac{\rho_{zell}}{\rho_F} \right) \cdot 100 \% \quad (2.3)$$

Die Gesamtporosität unterteilt sich nach *Laschet u. a. [44]* in eine primäre Porosität ε_{pr} und eine sekundäre Porosität ε_{sek} des Matrixmaterials (Feststoffes):

$$\varepsilon = \varepsilon_{pr} + \varepsilon_{sek} \quad (2.4)$$

Die Abbildung 2.2 zeigt die sekundäre Porosität der Hohlkugelstrukturen.

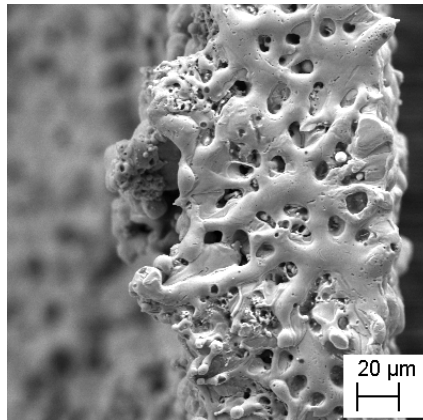


Abb. 2.2: Sekundäre Porosität des Matrixmaterials einer Hohlkugelstruktur (Rasterelektronenmikroskop, IWW, TU BAF)

Für die Beschreibung der zellulären Strukturen existieren Makro-, Mikro- und Mesocharakterisierungen, die *Degischer und Kriszt [24]* ausführlich beschreiben. Die Porosität und

die relative Dichte gehören damit zur Makrocharakterisierung. Der zweite wichtige Parameter ist nach *Degischer und Kriszt [24]* der Aufbau der zellulären Strukturen und die Form der Zellen, die zur Mikrocharakterisierung gehören.

Für die Charakterisierung von offenzelligen Strukturen werden solche geometrischen Größen wie Steg- (d_{steg}), Knoten- und Porengröße (d_{por}) verwendet (Abbildung 2.3). Die Porengröße kann in der Länge und in der Breite unterschiedlich sein. Häufig wird ein mittlerer Porendurchmesser angegeben. Offenzellige Strukturen sind im Allgemeinen anisotrop. Dies lässt sich durch Messungen ihrer Eigenschaften entlang der stehenden oder liegenden Stege nachweisen.

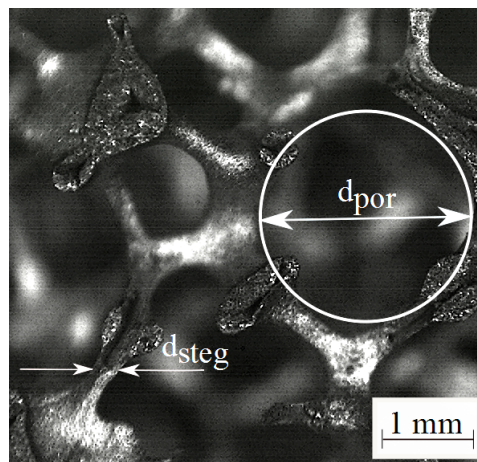


Abb. 2.3: Mikroskopaufnahme einer offenzelligen Struktur mit den wichtigsten geometrischen Größen

Für Hohlkugelstrukturen sind Charakterisierungsparameter der Porendurchmesser d_{por} und die Wanddicke d_{wand} , das heißt die Dicke der metallischen Schale (Abbildung 2.4). Die Hohlkugelstrukturen sind auf Grund der Herstellungsmethode relativ regelmäßig, mit Ausnahme von einigen Defekten (wie z. B. zusammengequetschten Schalen). Die geschlossenzelligen Strukturen, die durch Flüssigmetallurgie hergestellt wurden, sind sehr unregelmäßig, wie z. B. die Strukturen in der Abbildung 2.5. Bei solchen Strukturen ist es möglich, die Porengrößenverteilung oder einen Bereich für die möglichen Porendurchmesser anzugeben.

Für die Faserstrukturen werden nach *Kaviani [42]* solche Parameter wie Durchmesser und Länge der Fasern verwendet. Diese Materialien weisen eine deutliche Anisotropie aufgrund der verschiedenen Lage der Fasern auf.

Allgemein lässt sich feststellen, dass zelluläre Metallstrukturen in der Regel keine absolut regelmäßige Struktur aufweisen. Ihre Eigenschaften, wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit, können lokal unterschiedlich sein. Um mittlere Werte für die Gesamtstruktur zu erhalten, muss man entweder an vielen Positionen der Probe messen oder vorzugsweise bei der Messung

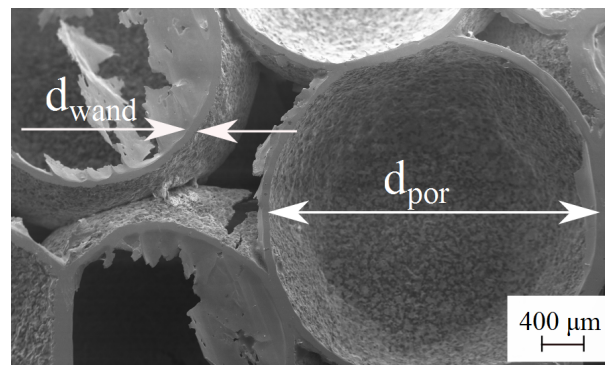


Abb. 2.4: Mikroskopaufnahme einer Hohlkugelstruktur mit den wichtigsten geometrischen Größen

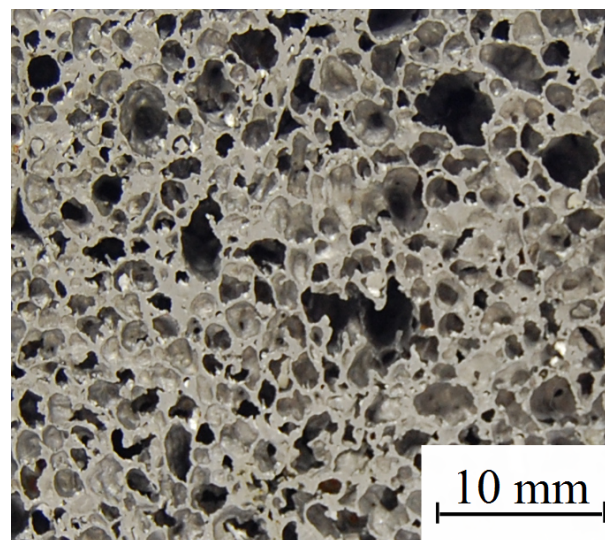


Abb. 2.5: Fotoaufnahme der geschlossenzelligen aufgeschäumten AlSi7-Strukturen

einen repräsentativen Ausschnitt erfassen. Daraus resultieren spezielle Anforderungen zum einen an die Probengröße und zum anderen an die anzuwendenden Messverfahren.

3 Grundlagen des Wärmetransportes in porösen metallischen Strukturen

Wärmetransport ist ein Energietransport infolge eines vorhandenen Temperaturgradienten im Material. Die Grundlagen der Wärmeübertragung werden in zahlreichen Büchern zum Beispiel von *Baehr und Stephan* [7] dargestellt. Die Wärmeleitung wird durch das 1822 von J. B. Fourier angegebene Grundgesetz mit der Gleichung:

$$\vec{q} = -\lambda (\text{grad } T) \quad (3.1)$$

beschrieben. Der Proportionalitätsfaktor λ ist eine materialspezifische Eigenschaft, die nicht von den Materialabmessungen oder der Wärmestromdichte \dot{q} abhängig ist und wird als Wärmeleitfähigkeit bezeichnet. Die Wärmeleitfähigkeit hängt bei vielen Materialien von der Temperatur T und vom Druck p ab:

$$\lambda = \lambda(T, p) \quad (3.2)$$

Die Gleichung 3.1 gilt für homogene Materialien. Die Homogenität der porösen metallischen Strukturen hängt von der Herstellungsmethode und dem dabei entstehenden strukturellen Aufbau ab. Bei nicht regulären Strukturen sind die thermophysikalischen Eigenschaften unter Umständen richtungsabhängig. Der Wärmetransport in porösen metallischen Strukturen wird durch folgende Mechanismen realisiert: Wärmeleitung im Feststoff, Wärmeleitung im Gas, Konvektion und Strahlung. Dies bedeutet, dass die Wärmeleitfähigkeit λ in der Gleichung 3.1 als die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} bezeichnet werden muss. λ_{eff} enthält alle Wärmetransportmechanismen, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

3.1 Festkörperwärmeleitung

Metalle besitzen auf Grund ihrer besonderen Struktur (freie Elektronen) eine hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit. Der prinzipielle Aufbau von Metallen und die daraus resultierenden Eigenschaften werden ausführlich von *Hornbogen und Warlimont* [40] beschrieben. Die für diese Arbeit wesentlichen Aussagen daraus sollen im Folgenden zusammengefasst werden.

Die meisten metallischen Werkstoffe bestehen aus vielen kleinen Kristallen, d. h. aus Anordnungen von Atomen, die sich periodisch im Raum wiederholen. Die Atome befinden sich unter der Wirkung folgender Kräfte: Anziehung zwischen freien Elektronen und Ionen und gegenseitige Abstoßung der gebundenen Elektronen und der Kerne der Atome untereinander. Mit den Gitterschwingungen in Metallen sind die spezifische Wärme, die thermische Ausdehnung und ebenfalls die elektrische und thermische Leitfähigkeit verbunden. Die hohe elektrische Leitfähigkeit entsteht durch die Bewegung freier Elektronen unter der Wirkung des elektrischen Feldes. Die freien Elektronen lassen sich nicht beliebig beschleunigen, da diese durch das Auftreffen auf die Ionen des Kristallgitters teilweise abgebremst werden. Dabei entsteht eine viskose Bewegung der Leitungselektronen, so dass laut Ohmschem Gesetz die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen und der Strom dem angelegten Feld proportional sind. Ganz entsprechend lässt sich die Wärmeleitfähigkeit deuten. Die Leitungselektronen transportieren Ladung und Energie und leisten einen Beitrag zur Wärmeleitfähigkeit eines Metalls. Der Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit λ und elektrischer Leitfähigkeit σ kann wie folgt dargestellt werden:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e} \right)^2 T = LT \quad (3.3)$$

Darin sind e die Elementarladung, k die Elektronenwellenzahl, T die absolute Temperatur und L die Lorenz-Zahl. Diese Gleichung wird als Wiedemann–Franz–Gesetz bezeichnet. Bei bekannter Lorenz-Zahl eröffnet sie die Möglichkeit, die leichter zu bestimmende elektrische Leitfähigkeit zu messen und die Wärmeleitfähigkeit daraus zu berechnen. In der Literatur wird die Lorenz-Zahl häufig mit $L = 2,445 \cdot 10^{-8} \, \Omega \text{ W/K}^2$ angegeben. Dieser Wert gilt aber nur für 0°C und reine Metalle. Eine umfassende Darstellung der tatsächlichen Lorenz-Zahl für unterschiedliche Metalle und Legierungen, auch in Abhängigkeit von der Temperatur, findet man bei *Powell* [56]. Dort ist zu erkennen, dass insbesondere bei Legierungen große Abweichungen zu der oben genannten Lorenz-Zahl bestehen. Daraus ist abzuleiten, dass die Wärmeleitfähigkeit der Metalle direkt gemessen werden sollte, um eine ausreichende Genauigkeit der Werte zu gewährleisten. Dies ist in dieser Arbeit beson-

ders wichtig, da für die Vergleichbarkeit von Ergebnissen die effektive Wärmeleitfähigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes bezogen werden muss (Kapitel 7).

3.2 Wärmeleitung in der Gasphase

Poröse metallische Strukturen beinhalten einen bedeutenden Volumenanteil an Gas, deshalb ist der Wärmetransport in der Gasphase, d. h. in Poren oder Hohlräumen, zu berücksichtigen. Die Wärmeleitfähigkeit des Gases ist um ein Vielfaches niedriger als die Wärmeleitfähigkeit des Metalls. Die Wärmeleitung im freien Gas erfolgt nach der kinetischen Gastheorie durch Zusammenstöße der Gasmoleküle untereinander. Dabei kommt es zur Impuls- und Wärmeübertragung zwischen Molekülen unterschiedlicher Temperatur. Nach *Schlünder und Tsotsas [65]* kann die Wärmeleitfähigkeit eines Gases näherungsweise nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\lambda_G = \frac{\bar{w} \Lambda (\rho c_v)_G}{3} \quad (3.4)$$

Darin ist \bar{w} die mittlere Geschwindigkeit der Gasmoleküle, Λ die mittlere freie Weglänge, ρ die Dichte und c_v die Wärmekapazität des Gases bei konstantem Volumen. Die mittlere freie Weglänge ist proportional zur Temperatur, umgekehrt proportional zum Druck und von der Gasart abhängig.

In kleinen Porenräumen oder bei geringen Gasdrücken kann es zu einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit gegenüber dem freien Gas kommen. Dies wird als Knudsen-Effekt bezeichnet und in *Schlünder und Tsotsas [65]*, *Wulf [86]* ausführlich erläutert. Ein Maß dafür ist die Knudsen-Zahl

$$Kn = \frac{\Lambda}{d_{por}} \quad (3.5)$$

Bei $Kn \ll 1$ kann mit der Wärmeleitfähigkeit des freien Gases gerechnet werden. Dies ist bei den verwendeten Metallschäumen der Fall.

3.3 Konvektion

Die Wärmeübertragung wird in der Gasphase zusätzlich durch den Mechanismus der Konvektion realisiert. Unter der natürlichen Konvektion versteht man die Wärmeübertragung, die durch die Gasströmung aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen den Porenwänden

und dem Porengas hervorgerufen wird. Dabei entsteht ein Dichteunterschied zwischen dem Gas unmittelbar an den Porenwänden und im Inneren der Pore, der durch den Auftrieb eine Strömung in der Pore hervorrufen kann. Für die Charakterisierung dieses Konvektionseinflusses wird als Kriterium für zelluläre Strukturen die Grashof-Zahl (*Gibson und Ashby [27]*) genommen. Die Grashof-Zahl charakterisiert das Verhältnis zwischen dem Auftrieb eines Fluids und der wirkenden Viskositätskraft. Die Grashof-Zahl kann nach der Gleichung:

$$\text{Gr} = \frac{g \beta_G \Delta T_{\text{por}} d_{\text{por}}^3 \rho_G^2}{\eta_G^2} \quad (3.6)$$

bestimmt werden. In der Gleichung 3.6 ist g die Fallbeschleunigung mit $9,81 \text{ m/s}^2$, β_G der isobare Wärmeausdehnungskoeffizient der Gasphase, ΔT_{por} die Temperaturdifferenz quer zu einer Pore, ρ_G die Dichte des Gases und η_G seine dynamische Viskosität und d_{por} die charakteristische Porengröße. Bei Hohlkugelstrukturen ist d_{por} der innere Kugeldurchmesser und bei offenzelligen Strukturen die Dicke der gesamten Struktur. Die Konvektion ist für die zellulären Strukturen nach *Holman [39]* zu berücksichtigen, falls die Grashof-Zahl größer als 1000 ist. Wenn man in Luft die minimale Porengröße für $\text{Gr} = 1000$ und $\Delta T_{\text{por}} = 10 \text{ K}$ ermittelt, erhält man einen Porendurchmesser von ca. 10 mm. Die Porengröße der zellulären Strukturen ist oft um den Faktor 10 kleiner und das bedeutet, dass die natürliche Konvektion vernachlässigt werden kann. Das wurde experimentell bestätigt, wie zum Beispiel durch *Baxter und Jones [10]*.

3.4 Wärmetransport durch Strahlung

Ein wichtiger Mechanismus beim Wärmetransport in zellulären Metallstrukturen ist die Strahlungswärmeübertragung. Alle Körper emittieren und absorbieren Energie durch Wärmestrahlung bei Temperaturen über dem absoluten Nullpunkt. Die ausführliche Beschreibung des Strahlungswärmetransportes ist beispielsweise bei *Siegel u. a. [68]*, *Baehr und Stephan [7]* dargestellt. Für die Charakterisierung des Strahlungswärmetransportes gibt es zwei Herangehensweisen. Die erste Methode beschreibt den Strahlungswärmetransport, der in porösen metallischen Strukturen zwischen den Wänden der Hohlräume aufgrund des Temperaturunterschiedes dieser Wände stattfindet. Dabei betrachtet man die Strahlung nur als lokales Phänomen in der Pore. Dies ist bei Hohlkugelstrukturen zutreffend. In diesem Fall beschreibt das Stefan-Boltzmann-Gesetz den Strahlungswärmestrom zwischen

zwei Oberflächen mit den Temperaturen T_1 und T_0 :

$$\dot{q}_{Str}^0 = \beta \sigma_{Str} (T_1^4 - T_0^4) \quad (3.7)$$

Darin ist σ_{Str} die Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$) und β ist der Strahlungsaustauschgrad, der die Emissionsgrade der beiden Oberflächen und die konkrete Geometrie berücksichtigt. Dabei ist der Emissionsgrad vom Material und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig.

Die zweite Methode ist die Betrachtung der Strahlung in der porösen metallischen Struktur insgesamt. Dabei wird das Material als Kontinuum mit einheitlichen Eigenschaften betrachtet. Diese Herangehensweise wird für offenzellige Strukturen eingesetzt. Dabei ist die optische Dicke τ_0 des porösen Mediums zu berücksichtigen, die nach *Siegel u. a. [68]* mit folgendem Verhältnis bestimmt wird:

$$\tau_0 = \frac{s}{l_P} \quad (3.8)$$

In der Gleichung 3.8 ist s die Schichtdicke und l_P die mittlere freie Weglänge der Photonen. Die optische Dicke ist ein Maß für das Abschwächen der Strahlung in der porösen Struktur über die Schichtdicke einer Probe. Um die Strahlung als lokalen diffusiven Prozess auffassen zu können, muss $\tau_0 \gg 1$ (nach *Reiss [61]* mindestens jedoch $\tau_0 \geq 15$) gelten. Bei der Platzierung der zellularen metallischen Struktur zwischen zwei Oberflächen mit verschiedenen Temperaturen wird in diesem Fall das Beersche Gesetz (z. B. bei *Gibson und Ashby [27]*) für die Berücksichtigung dieser Abschwächung der Intensität der Strahlung eingesetzt:

$$\dot{q}_{Str} = \dot{q}_{Str}^0 e^{-(K_{zell} d_{zell})} \quad (3.9)$$

Dabei ist K_{zell} der Extinktionskoeffizient für die zelluläre metallische Struktur und d_{zell} ist ihre Dicke. Bei der vereinfachten Bestimmung für optisch dünne Wände und Stege wird der Extinktionskoeffizient der zellularen metallischen Struktur mit folgender Gleichung berechnet (*Gibson und Ashby [27]*):

$$K_{zell} = K_F \frac{\rho_{zell}}{\rho_F} \quad (3.10)$$

K_F ist darin der Extinktionskoeffizient des Feststoffgerüsts mit der sekundären Porosität ε_{sek} und ρ_{zell}/ρ_{fest} die relative Dichte der Struktur. Der Strahlungstransport in der Gesamtstruktur wird nun wieder auf das Stefan-Boltzmann-Gesetz und Gleichung 3.7 zurückgeführt, nur dass T_1 und T_0 jetzt die äußeren Oberflächentemperaturen der porösen Struktur sind. Um den Wärmetransport auf eine sogenannte Strahlungsleitfähigkeit

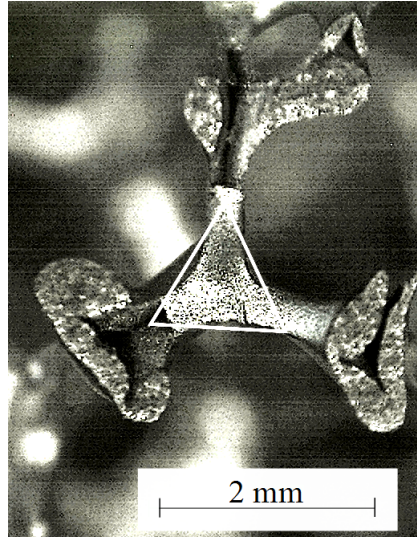


Abb. 3.1: Mikroskopaufnahme von einer offenzelligen Struktur und idealisierte Knotendarstellung

zurückzuführen, wird Gleichung 3.1 für den eindimensionalen Fall verwendet:

$$\dot{q} = -\lambda_{Str} \frac{dT}{dx} = \dot{q}_{Str} \quad (3.11)$$

Bei Verwendung der Approximationen $dT/dx \approx (T_1 - T_0)/s$ und $T_1^4 - T_0^4 \approx 4\Delta T \bar{T}^3$ mit der mittleren Temperatur $\bar{T} = (T_1 + T_0)/2$ kann der Strahlungsanteil λ_{Str} der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus der Gleichung:

$$\lambda_{Str} = 4\beta \sigma \bar{T}^3 d_{steg} e^{-\left(K_F \frac{\rho_{zell}}{\rho_F} s\right)} \quad (3.12)$$

berechnet werden.

Glicksman [29] hat ein vollständiges Modell für die Bestimmung von Extinktionskoeffizienten entwickelt. Dabei wurden Polyurethanschäume untersucht. Aufgrund der gleichartigen Struktur wird diese Betrachtung für Metallschäume übernommen. Dabei unterscheiden sich die Stege und die Knoten in der porösen Struktur, so dass der Extinktionskoeffizient der Knoten nach:

$$K_{Knoten} = 4,10 \sqrt{\frac{v(\rho_{zell}/\rho_F)}{d_{por}}} \quad (3.13)$$

bestimmt wird. Die Abbildung 3.1 stellt eine offenzellige Struktur dar und präsentiert die idealisierte Knotendarstellung.

Der Extinktionskoeffizient der Stege oder der Porenwände wird für den Fall fünfeckiger

Dodekaeder als Porenform mit folgender Gleichung

$$K_{Steg} = \frac{3,46 (1 - e^{-2 K_F d_{Steg}})}{d_{por} (1 + e^{-2 K_F d_{Steg}})} \quad (3.14)$$

berechnet. In den Gleichungen 3.13 und 3.14 ist v der Volumenanteil des Feststoffes in den Knoten, d_{por} der Porendurchmesser, d_{steg} die Dicke der Stege oder der Wände. Die Dicke der Stege lässt sich durch folgende Gleichung bestimmen:

$$d_{Steg} = \frac{(1 - v) \rho_{zell} d_{por}}{3,46 \rho_F} \quad (3.15)$$

Für die Bestimmung der Strahlungsleitfähigkeit hat *Glicksman* [29] die Rosseland-Gleichung

$$\lambda_{Str} = \frac{16 \sigma \bar{T}^3}{3 K^*} \quad (3.16)$$

verwendet. Dabei ist K^* der Extinktionskoeffizient, der mit folgender Gleichung berechnet wird:

$$K^* = K_{Knoten} + K_{Steg} \quad (3.17)$$

Aus der vorherigen Betrachtung lässt sich feststellen, dass der Strahlungseinfluss mit steigender Porengröße zunimmt und mit Erhöhung der relativen Dichte abnimmt.

3.5 Gesamtwärmetransport

Nach der Beschreibung der einzelnen Wärmetransportmechanismen ist es notwendig, in realen metallischen porösen Strukturen den Gesamtwärmetransportprozess zu betrachten. Die effektive Wärmeleitfähigkeit der metallischen porösen Strukturen ist wesentlich niedriger als die des Grundmaterials. Die wichtigen Anteile, aus denen die effektive Wärmeleitfähigkeit besteht, werden in der folgenden Gleichung aufsummiert, die jedoch nur gültig ist, wenn die Strahlung als lokales diffusives Problem betrachtet werden kann, weil dann keine Kopplung zwischen den Wärmetransportprozessen stattfindet:

$$\lambda_{eff} = \lambda_L + \lambda_{Kon} + \lambda_{Str} \quad (3.18)$$

Der darin enthaltene Anteil der Wärmeleitung λ_L ist von den Wärmeleitfähigkeiten der beiden Phasen und dem strukturellen Aufbau abhängig:

$$\lambda_L = f(\lambda_G; \lambda_F; Struktur) \quad (3.19)$$

Dabei kann der Anteil der Konvektion λ_{Kon} , wie bereits beschrieben, in nicht durchströmten Metallschäumen oft vernachlässigt werden. Der Strahlungsanteil λ_{Str} spielt eine wichtige Rolle bei höheren Temperaturen. Für die Beschreibung der Wärmetransportmechanismen wurden zahlreiche Modelle entwickelt. Dabei ist der konkrete Aufbau der metallischen porösen Strukturen zu berücksichtigen. Die einfachsten Modelle der Wärmeleitung in Feststoff und Gas wurden von *Wiener* [85] formuliert. Seine Plattenmodelle mit der Reihen- und Parallelschaltung von Feststoff und Gasphase ergeben die untere und obere Grenze der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei alleiniger Betrachtung der Wärmeleitung. Aber die reale Struktur der zellularen metallischen Materialien ist viel komplexer. Im Kapitel 4 wird tiefer auf verschiedene, auch aufwändigere Modelle eingegangen.

4 Messung der Wärmeleitfähigkeit von Metallschäumen – Literaturanalyse

Metallschäume sind poröse Materialien, die aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften stark zunehmendes Interesse finden. Dies gilt unter anderem auch für die Wärmetransportvorgänge in den Schäumen. Die Zahl der bis zum Jahr 2012 zu diesem Thema veröffentlichten Untersuchungen ist groß. Sie werden in diesem Kapitel systematisch dargestellt. Im Jahr 2009 wurde von *Solorzano u. a.* [72] eine Analyse der veröffentlichten Untersuchungen für zelluläre Strukturen wie Isolationsschäume (Polymere) und Leitungsschäume (conducting-based foams) präsentiert. Diese Veröffentlichung beschränkt sich auf die Wärmetransportmechanismen bei Raumtemperatur. Die berücksichtigten metallischen zellulären Strukturen wurden aus gut leitenden Grundmaterialien, wie Mg, Al, Cu, Zn und AlSi6Cu3 hergestellt. Die gemessenen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit wurden auf die Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials bezogen und über der relativen Dichte der zellulären metallischen Strukturen dargestellt. Es fehlt eine Analyse des Temperatureinflusses auf die effektive Wärmeleitfähigkeit und die Betrachtung von Metallschäumen, die für Wärmedämmung eingesetzt werden. Die analysierten Strukturen von *Solorzano u. a.* [72] umfassen damit nur einen Teil der bisher untersuchten Metallschäume. Im selben Jahr 2009 haben die gleichen Autoren in einem Buch von *Öchsner und Augustin* [53] grob die Bereiche der Wärmeleitfähigkeit von einigen zellulären metallischen Strukturen dargestellt.

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den nichtdurchströmten offenen Metallschäumen sowie Metallschäumen mit geschlossener Porosität und gibt einen umfassenden Überblick über die bisher veröffentlichten experimentellen Untersuchungen und Modelle zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Durch die umfassende Diskussion der Abhängigkeit von der Temperatur und von der Struktur solcher Metallschäume geht es weit über die Darstellungen in *Solorzano u. a.* [72] hinaus.

4.1 Untersuchte Materialien

Die physikalischen Eigenschaften der zellularen Materialien sind hauptsächlich von der Struktur, wie Porengröße, Porosität und Grundmaterial abhängig (*Stephani u. a. [75]*). Für die notwendige Bestimmung der Porenform, der Porengröße, der Dicke der Porenwand und der Anisotropie müssen spezielle Untersuchungen durchgeführt werden. Die Möglichkeiten der Strukturcharakterisierung werden von *Banhart [8]* ausführlich analysiert und dargestellt. Man unterscheidet zerstörende und nicht zerstörende Methoden der Strukturanalyse. Für die Charakterisierung der Metallschäume werden bevorzugt die nicht zerstörenden Methoden eingesetzt, um an den selben Proben die thermophysikalischen Eigenschaften bestimmen zu können. Die am häufigsten verwendete Methode für die Analyse der porösen Strukturen ist die Micro-Computer Tomographie. *Solorzano u. a. [69, 71, 70]* nutzten ein Micro-Computer Tomographie System mCT40 für Magnesiumschäume, um die Verteilung der Dichte der porösen Proben in Raumzellen von 10 mm Kantenlänge zu messen. In der Arbeitskammer wurden die Proben gedreht und vom Detektor in jeder Position durch X-ray im Durchlicht Abbildungen erfasst. Mit Hilfe dieser Abbildungen wurde die Porosität entlang des Probekörpers und solche Parameter wie Porengröße, Dicke der Porenwand und Anisotropie bestimmt. Diese Methode wurde für die Charakterisierung von pulvermetallurgisch hergestellten (PM) AlSi7-Schäume verwendet. Obwohl die Auflösung des verwendeten Scanners für die quantitative Analyse der Struktur nicht ausreicht, ist sie zur Bestimmung der Dichteverteilung optimal. In *Vicente u. a. [82]* und *Laschet u. a. [44]* wurde die X-ray Micro-Computer Tomographie verwendet, um 3D Mikrostrukturen von porösen Proben zu charakterisieren. Mit dieser Methode wurden geometrische Messungen, wie die Bestimmung der spezifischen Oberfläche und die Porenverteilung durchgeführt sowie die Porosität bestimmt. Außerdem ist es möglich, durch Segmentierung einzelne Objekte (Zellen, Schichten, ...) und deren strukturelle Eigenschaften zu analysieren. Nur bei *Kitazono [43]* wurde die Struktur der porösen Stoffe mit Hilfe eines optischen Mikroskops analysiert. Um die Form der Poren zu bestimmen, wurden die Poren mit Graphitpulver angefärbt. Zur Bestimmung der spezifischen inneren Oberfläche wurde bei *Nestler u. a. [51]*, *Nestler [50]* die Methode von Brunauer, Emmett und Teller (BET) verwendet.

Die strukturellen Eigenschaften der Metallschäume sind von der Herstellungsmethode abhängig. Die zahlreichen Herstellungsverfahren werden von *Banhart [8]* ausführlich beschrieben. Sie unterscheiden sich grundlegend nach dem Zustand des Grundmaterials wie z. B. flüssiges Metall, festes Metall im Form vom Pulver, Metaldampf oder Metallionenlösung. Bei der Herstellung aus flüssigem Metall werden folgende Methoden verwendet: Aufschäumen mit Gas (z. B. *Solorzano u. a. [69]*, *Ogushi u. a. [54]*, *Tzeng und Ma [79]*),

Gießen und Spritzpressen (z.B. *Agapiou und Devries [3]*) sowie schmelzmetallurgische Verfahren durch Druckinfiltration von Platzhaltergranulat (Polystyrol, z.B. *Nestler u. a. [51]* oder Salz wie z.B. bei *Cherny u. a. [18]*). Wenn die Metallschäume aus Metallpulver hergestellt werden, stehen folgende Methoden zur Verfügung: Sintern von Hohlkugeln (z.B. *Zhao u. a. [88]*), Aufschäumen, Pressen um einen Füllstoff, Sintern von Pulver oder von Fasern (z.B. *Solorzano u. a. [71]*, *Laschet u. a. [44]*, *Fend u. a. [25]*, *Solorzano u. a. [73]*, *Andersen u. a. [4]*, *Solorzano u. a. [70]*, *Calmidi und Mahajan [17]*, *Andersen und Meinert [5]*, *Veyhl u. a. [81]*), Fließpressen des metallischen oder polymeren Gemisches (z.B. *Abramenko u. a. [1]*) und reaktives Sintern (z.B. *Tzeng und Ma [79]*, *Sauerhering und Reutter [63]*). Bei der Herstellung der Metallschäume aus einer Metallionenlösung wird der elektrochemische Abschlag verwendet. In einigen Fällen wird zur Herstellung der Niederschlag aus metallischem Dampf genutzt. Die am häufigsten verwendeten Methoden für die Herstellung der Metallschäume sind das Sintern aus festem Metall im Form von Pulver oder Fasern und das Einblasen von Gas in flüssiges Metall.

4.2 Verwendete Messverfahren für die effektive Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit wird maßgeblich durch die Verteilung der zwei Phasen (Feststoff und Gas) bestimmt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit ist abhängig von der Porosität, der Struktur der Schäume und den physikalischen Eigenschaften der beiden Phasen.

Nach *Coquard u. a. [21]* gestaltet sich die Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus den Messwerten der einzelnen Phasen äußerst schwierig. Gründe dafür sind die komplexe Struktur von Metallschäumen und der große Unterschied zwischen den Wärmeleitfähigkeiten des Gases und des Feststoffes. Für jedes Berechnungsmodell ist deshalb ein experimenteller Nachweis des Modells sehr wichtig. Tabelle 4.1 präsentiert die bisher untersuchten porösen metallischen Strukturen. Die dabei verwendeten verschiedenen Messverfahren werden im nachfolgenden Kapitel näher beschrieben.

Tab. 4.1: Literaturüberblick der bisher untersuchten Materialien

Autor	Material, Struktur	λ_F ($W/m\ K$)	d_{por} (mm) von - bis	T (K) von - bis	E (%) von - bis	Messmethode
<i>Abramenko u. a. [1]</i>	Al, g	150	-	296	69 - 79	MH (q)
<i>Andersen u. a. [4]</i>	FeCrAl23.15, f	8	-	370 - 1080	70 - 90	LFA (t), PC (s)
<i>Andersen u. a. [4]</i>	Ni ₃ Al, f	20	-	370 - 1080	70 - 90	LFA (t), PC(s)
<i>Babcsan u. a. [6]</i>	Al, g	-	1,5 - 2,5	300 - 780	80 - 93	CL (s)
<i>Berg u. a. [11]</i>	Al99.7, o	210 [A.1]	-	RT	70 - 82	P (s)
<i>Bhattacharya u. a. [12]</i>	Al-Leg.(T-6201), o	218	0,5 - 5	298	90 -97	P (s)
<i>Calmidi und Mahajan [17]</i>	Al-Leg., o	218	-	288	90 - 97	P (s)
<i>Coquard u. a. [22]</i>	FeCr-Leg., o	16 [21]	0,3 - 1,4	296 - 673	96 - 97	LFA (t)
<i>Coquard u. a. [21]</i>	FeCr-Leg., o	16	1,2	RT	94 - 95	HW (t)
<i>Coquard u. a. [22]</i>	NiCrAl-Leg., o	13,4 [21]	0,6 - 1,4	296 - 673	92 - 94	LFA (t)
<i>Degischer und Kriszt [24]</i>	AlMgSi0.6, o	-	-	293 - 680	81, 85	-
<i>Degischer und Kriszt [24]</i>	Al 99.6, o	120	-	293 - 680	88	-
<i>Degischer und Kriszt [24]</i>	AlSi12, o	230	-	293 - 680	83	-
<i>Fend u. a. [25]</i>	Ni-Leg., o	11,1	-	293	57 - 83	TPS (t)
<i>Hohenauer und Lager [38]</i>	Mg, o	156	2 - 3	171 - 673	76	LFA (t)
<i>Kitazono [43]</i>	AlMg-Leg., g	89	> 1	RT	20 - 50	LFA (t)
<i>Laschet u. a. [44]</i>	Ni-Leg. (Inconel), o	9,8 [A.1]	-	RT	40 - 70	TPS (t)
<i>Nestler [50]</i>	AlSi9Cu3, o	132	-	303	65 – 75 ^{b)}	PC (s)
<i>Nestler u. a. [51]</i>	AlSi9Cu3, o	132 [50]	-	RT	65 - 80	TPS (t), P (s)
<i>Ogushi u. a. [54]</i>	Cu, o	335	0,02 - 0,36	RT	24-34	CL (s)
<i>Paek u. a. [55]</i>	Al-Leg., o	218	1,25	RT	88 - 96	PC (s)

Tab. 4.1: Literaturüberblick der bisher untersuchten Materialien

Autor	Material, Struktur	λ_F ($W/m\ K$)	d_{por} (mm) von - bis	T (K) von - bis	E (%) von - bis	Messmethode
<i>Quadbeck u. a. [59, 58]</i>	Mo, o	149	-	RT	94	LFA (t)
<i>Quadbeck u. a. [59, 58]</i>	CrNiMo(SUS 316L), o	15	-	RT	90 - 91	TPS (t)
<i>Solorzano u. a. [73]</i>	Al, g	160	1 - 3	RT	50 - 75	TPS (t)
<i>Solorzano u. a. [71]</i>	AlSi7, g	167 [70]	-	RT	30 - 80	TPS (t)
<i>Solorzano u. a. [70]</i>	AlSi7, g	167	-	296	50 - 81	TPS (t)
<i>Solorzano u. a. [71]</i>	AlSi9Cu3, o	132 [50]	-	RT	65 - 75	TPS (t)
<i>Solorzano u. a. [69]</i>	Mg (AZ91),g	72,7	-	RT	15 - 35	TPS (t)
<i>Solorzano u. a. [71]</i>	Zn, g	72,7 [69]	-	RT	74 - 95	TPS (t)
<i>Stephani u. a. [75]</i>	Mo, pg	140	-	500 – 1050 ^{d) e)}	^{b)}	-
<i>Sullins und Daryabeigi [77]</i>	Ni, o	-	-	340 – 1000 ^{d)}	97 ^{a) c)}	P (s)
<i>Thewsey und Zhao [78]</i>	Cu, o	390	0,40 - 1	373	22 - 85	CL (s)
<i>Tzeng und Ma [79]</i>	Al, g	-	-	RT	74 - 95	HFM (s)
<i>Vicente u. a. [82]</i>	Ni (Inconel), o	-	1,5 - 1,8	RT	89 - 91	PT
<i>Zhao u. a. [88]</i>	FeCrAlY, o	-	0,28 - 0,84	300 - 740	90 – 95 ^{a)}	GHP (s)

o ...	offenzellige	g ...	geschlossenzellige	f ...	Faserstruktur	pg ...	partiell geschlossenzellige
HFM...	Heat-Flow-Meter	TPS...	Transient-Plane-Source-Technique	MH...	Monotonic Heating	LFA...	Laser-Flash-Apparatur
HW...	Hot-Wire	CL...	Comparative Longitudinal	PC...	Plate - Comparative	GHP...	Guarded-
P...	Plate	PT...	Photo-Thermal				... (s) stationär
a) ...	Vakuum	b) ...	6 bar	c) ...	133,32 Pa		... (t) transient
d) ...	N ₂	e) ...	He				... (t) quasistationär

Die Messverfahren zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit werden hinsichtlich ihrer Methode in stationäre (s), instationäre (transiente (t)) und quasistationäre (q) eingeteilt. Bei den stationären Messverfahren liefert die Fourier'sche Differentialgleichung aufgrund der Randbedingungen im Allgemeinen eine einfache Gleichung für das örtliche Temperaturfeld in der Probe. Durch Einsetzen in Gleichung 3.1 kann dann die Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. Dazu muss die Wärmestromdichte über eine Temperaturdifferenz entlang der Normalen zur Oberfläche des Probenkörpers bestimmt werden. Die stationären Messverfahren unterteilen sich zusätzlich in absolute und relative (*Wulf [86]*). Während man bei den Relativverfahren einen Referenzkörper benötigt, ist es bei den absoluten Messverfahren notwendig, die Wärmestromdichte über das Material direkt zu bestimmen. Das kann z. B. bei elektrischer Beheizung unmittelbar aus der Heizleistung erfolgen. Die großen Vorteile der stationären Messmethoden liegen in der guten Genauigkeit, einfachen Berechnungsgleichungen und der Möglichkeit, gerichtet zu messen. Zu den Nachteilen dieser Methoden gehören die langen Messzeiten bis zum Erreichen des stationären Zustandes und der große apparative Aufwand (*Wulf [86]*). Zahlreiche Messungen wurden mit solchen stationären Plattenmessverfahren durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung des Messaufbaus und die genauere Funktionsweise eines solchen Plattenverfahrens sind im Kapitel 6.1 dargestellt. Dazu gehört die Guarded-Hot-Plate-Method nach DIN EN 12667, die von *Berg u. a. [11]*, *Zhao u. a. [88]*, *Nestler u. a. [51]* und *Nestler [50]* verwendet wurde. Dabei wurde von *Zhao u. a. [88]* dieses Messverfahren bis zu einer Temperatur von 800 °C eingesetzt. Bei *Nestler [50]* wurde das Messgerät ohne Schutzheizung und ohne Wärmedämmung gebaut. Die seitlichen Wärmeverluste wurden durch Referenzkörper bestimmt und in der Auswertung berücksichtigt. Dabei ist es nicht möglich, die Messunsicherheit einzuschätzen. Eine modifizierte Version der Guarded-Hot-Plate-Method wurde von *Calmidi und Mahajan [17]* verwendet. Dabei wurden Platten aus Aluminium auf die Probe von der unteren und oberen Seiten aufgelötet, um eine bessere Kontaktierung zu erreichen. Die Messunsicherheit bei diesem Verfahren wird von *Calmidi und Mahajan [17]* mit 3,6 % angegeben.

Relative stationäre Messverfahren, so genannte Vergleichsverfahren, wurden von *Ogushi u. a. [54]*, *Andersen u. a. [4]*, *Babcsan u. a. [6]*, *Paek u. a. [55]*, *Veyhl u. a. [81]* verwendet. Dabei wird keine Wärmestromdichte gemessen. Zusätzlich wird ein Referenzmaterial mit bekannter Wärmeleitfähigkeit eingesetzt und die Wärmeleitfähigkeit des untersuchten Materials lässt sich nach *Wulf [86]* mit folgendem Verhältnis

$$\lambda = \lambda_{Ref} \frac{\Delta T_{Ref}}{\Delta T} \frac{s}{s_{Ref}} \quad (4.1)$$

bestimmen. In der Arbeit von *Ogushi u. a. [54]* wird dabei ein Relativverfahren mit axia-

lem Wärmestrom mit der Messunsicherheit 10 % beschrieben, das in *Maglic u. a. [46]* als „Comparative Longitudinal Steady-State Method“ bezeichnet wird. Weiterhin verwendeten *Tzeng und Ma [79]* Wärmeflussmesser. Das Messprinzip ist identisch wie „Heat-Flow-Meter-Apparatus“ nach ISO 8301:1991. Der gesamte Messaufbau ist identisch zu den Plattenmessverfahren. Der Vorteil dieser Messmethode nach *Salmon und Tye [62]* ist die Schnelligkeit der Bedienung und die verbesserte Bestimmung der Wärmestromdichte mit einem stabilen, dünnen Wärmeflussensor, der eine größere Fläche abdeckt.

Bei der Nutzung der stationären Messverfahren für die porösen Strukturen gibt es jedoch eine Reihe von Problemen. Besonders schwierig zu realisieren ist der Kontakt zwischen der Probe und den Heiz- und Kühlplatten. Dieser intensive Kontakt ist aber die Grundlage für die optimale Arbeitsweise der Apparaturen. Eine Alternative wäre die Verwendung von sogenannten Panel-Test-Verfahren. Dabei wird die Probe ohne Kontakt beheizt und der Wärmestrom in einem Kalorimeter gemessen. Allerdings muss man dabei die Temperaturen direkt in der Probe messen und damit das Anbringen der Thermoelemente realisieren. Im Fall einer porösen Struktur ist der Kontaktwiderstand zwischen Thermoelementen und Probe zu berücksichtigen. Außerdem ist es bei allen Plattenverfahren schwierig, einen eindimensionalen Wärmefluss zu erreichen, wie auch *Öchsner und Augustin [53]* erwähnen. Außerdem wird bei einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit des Probekörpers ein langer Zeitraum bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustandes benötigt.

Alle instationären Messverfahren basieren auf der transienten Lösung des Temperaturfeldes, wobei die Temperatur in der Probe von der Zeit abhängt. Der große Vorteil dieser Methoden ist, dass diese Messungen über einen kurzen Zeitraum durchgeführt werden können. Dabei werden die zeitabhängigen Messungen lokal durchgeführt. Der mathematische Aufwand ist jedoch wesentlich größer im Vergleich zu den stationären Messverfahren, wie in der Arbeit von *Wulf [86]* bemerkt wird.

Als instationäres Messverfahren wird bei porösen Materialien die „Transient-Plane-Source-Technique“ (TPS) besonders häufig verwendet, wie z. B. in den Arbeiten von *Solorzano u. a. [73, 70, 69, 71]*, *Laschet u. a. [44]*, *Fend u. a. [25]*, *Sauerhering und Reutter [63]* und *Nestler u. a. [51]*. Diese Technik arbeitet in einem sehr breiten Temperaturbereich von -100 bis 750 °C und soll einen Wärmeleitfähigkeitsbereich von $0,005$ bis 500 W/(m K) abdecken (Angaben der Hersteller). Dabei werden mit der speziellen Software die Temperaturleitfähigkeit und die volumetrische Wärmekapazität parallel zur Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Die Temperaturbeschränkung beruht auf der Anwendungstemperatur der Isolationsschichten der Sensoren. Sensoren, die mit Kapton beschichtet sind, können ab -100 °C bis 300 °C eingesetzt werden. Sensoren mit der Schichtsilikatbeschichtung Mica können von 150 °C bis maximal 750 °C verwendet werden. Neuere Untersuchungen zei-

gen jedoch, dass hohe Temperaturen nur unter Schutzgasatmosphäre möglich sind, da ansonsten die Sensoren nach wenigen Messungen durch Oxidation zerstört werden. Die Genauigkeit bei Standardmessungen ist besser als 5 % (Angaben der Hersteller). Der genaue Messaufbau und die Funktionsweise werden im Kapitel 6.2.1 dargestellt. Ein Vorteil gegenüber dem häufig verwendeten Heißdrahtverfahren, das z. B. in der Arbeit von *Coquard u. a. [21]* eingesetzt wurde, ist die einfachere Einbettung des Sensors zwischen den beiden Probenhälften (*Wulf [86]*). Für die Auflage des Sensors braucht man wie bei den Plattenverfahren ebene Oberflächen der Probekörper, aber der dünne und flexible Sensor ermöglicht eine deutlich bessere Kontaktierung mit den untersuchten Materialien, als bei den starren Heiz- und Kühlplatten der Plattenverfahren. Für die Reduzierung des thermischen Kontaktwiderstandes wurden die äußeren Oberflächen in der Arbeit von *Solorzano u. a. [70]* poliert. *Abramenko u. a. [1]* haben die Messungen mit einem Verfahren mit der Bezeichnung „Monotonic heating“ durchgeführt. Darunter ist ein quasistationäres Messverfahren mit kontinuierlicher Aufheizung zu verstehen.

Ein weiteres instationäres Messverfahren ist die Laser-Flash-Apparatur, die z. B. in *Öchsner und Augustin [53]* beschrieben wurde. Bei der Laser-Flash-Apparatur wird nur die Temperaturleitfähigkeit direkt gemessen. Die indirekte Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach der Gleichung

$$\lambda(T) = a(T) c_p(T) \rho(T) \quad (4.2)$$

erfordert die Kenntnis der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität, die zusätzlich gemessen werden müssen. Dies hat einen Einfluss auf die zu erwartende Messunsicherheit, da jede gemessene Einzelgröße fehlerbehaftet ist. Der Laserstrahl muss bei der Laser-Flash-Technik an der Oberfläche der Probe absorbiert werden und darf nicht durch die Poren bereits tiefer in das Material eindringen. Daher müssen die Poren auf der Ober- und Unterseite der Probe mit einer dünnen durchgängigen Schicht, z. B. aus SiC, abgedichtet werden. Die Probenpräparation gestaltet sich daher schwierig und aufwändig. Proben mit sehr großen Poren sind nicht messbar. *Andersen u. a. [4]* haben diese Methode für metallische Faserstrukturen mit Porositäten $< 70\%$ im Temperaturbereich 100 °C bis 1200 °C verwendet. In der Arbeit von *Coquard u. a. [21]* werden Messungen an offenzelligen Metallschäumen mit Porositäten $> 80\%$ bei Raumtemperatur dargestellt und später wurde in der Arbeit von *Coquard u. a. [22]* die Laser-Flash-Apparatur für den gleichen Typ von offenzelligen Strukturen bis 400 °C verwendet. Für geschlossenzellige Al-Mg (SP5083) Strukturen wurde die Laser-Flash-Apparatur von *Kitazono [43]* bei Raumtemperatur eingesetzt. In den Arbeiten von *Andersen u. a. [4]* und *Coquard u. a. [21]* gibt es

keine Information über die Probenpräparation, obwohl die Vorbereitung der Oberfläche des Probenkörpers bei dieser Messtechnik eine ganz wichtige Rolle spielt. In der Arbeit von *Kitazono* [43] wurden die Oberflächen der porösen Strukturen mit Graphit-Pulver beschichtet und bei *Coquard u. a.* [22] wurde bei der Messung eine schwarze Beschichtung mit bekannter Dicke verwendet, deren thermophysikalische Eigenschaften bekannt sind. Die Auswertung der Laser-Flash-Messungen wird bei *Coquard u. a.* [22] für Schäume mit einem speziellen theoretischen Modell durchgeführt. Dabei wird die Kopplung zwischen Leitungs- und Strahlungstransport simuliert. Um die Ergebnisse der indirekten Wärmeleitfähigkeit-Messung zu bewerten, ist es wichtig zu wissen, wie die spezifische Wärmekapazität bestimmt wurde. Beim *Coquard u. a.* [22] wurde die Wärmekapazität aus den Wärmekapazitäten der Luft und des Feststoffes berechnet. Dagegen gibt es in den Arbeiten von *Kitazono* [43], *Andersen u. a.* [4] keine Information über die Bestimmung der Wärmekapazität. *Kitazono* [43] bemerkt, dass die Laser-Flash-Apparatur für poröse Strukturen nicht geeignet ist.

Als Fazit ist zu erkennen, dass sehr unterschiedliche Messmethoden bisher zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit poröser Werkstoffe eingesetzt wurden. Bei der Betrachtung der Messergebnisse der Wärmeleitfähigkeit muss man genau analysieren, wie die Messungen durchgeführt wurden, wie die Proben präpariert wurden und wie groß das Vertrauen in die gemessenen Werte sein kann. Als eine vielversprechende Variante wird von vielen Autoren die oben beschriebene „Transient-Plane-Source-Technique“ (TPS) angesehen.

4.3 Vergleich der Messergebnisse

Bei bisherigen Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit wurde der Einfluss solcher Parameter wie Porosität, Porengröße Temperatur und Druck analysiert.

4.3.1 Einfluss der Porosität (bei Raumtemperatur)

Die effektive Wärmeleitfähigkeit von porösen Strukturen wird (wie in Kapitel 3 erläutert) von Parametern wie den Wärmeleitfähigkeiten des festen Stoffes und des Gases, der Strahlung und durch die natürliche Konvektion bestimmt. Bei Raumtemperatur werden die Strahlung und die Konvektion oftmals nicht berücksichtigt (z. B. *Fend u. a.* [25]). In Abbildung 4.1 wird die effektive Wärmeleitfähigkeit von nichtdurchströmten Metallschäumen in Abhängigkeit von der Porosität bei Raumtemperatur dargestellt.

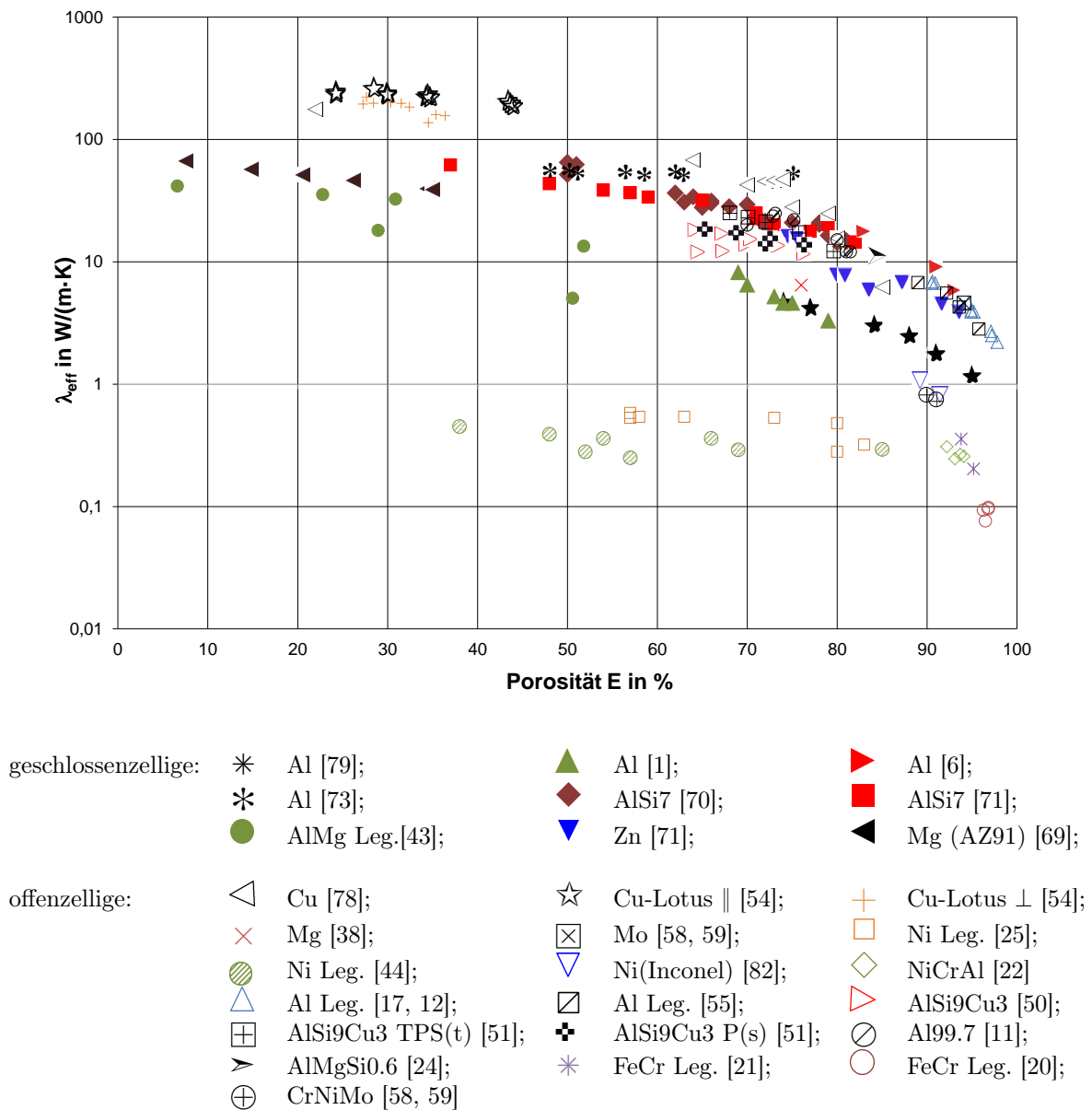


Abb. 4.1: Effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Porosität bei Raumtemperatur

Dabei wurden Messwerte aus der Literatur sowohl für offenzellige als auch für geschlossenzellige Strukturen im gesamten Porositätsbereich berücksichtigt. Aus der Abbildung 4.1 ist zu erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit mit wachsender Porosität abnimmt. Das ist dadurch zu erklären, dass bei größerer Porosität der Anteil der Luft steigt und der Anteil des festen Stoffes mit der deutlich höheren Wärmeleitfähigkeit geringer wird. Aus der Abbildung 4.1 ist weiterhin zu erkennen, dass alle Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit in einem sehr großen Bereich liegen (0,1 W/(m K) bis 160 W/(m K) bei Porositäten von 6 bis 99 %). Außer der Porosität sind die Eigenschaften des Grundmaterials zu berücksichtigen. Wie aus der Tabelle 4.1 hervorgeht, liegen diese Werte zwischen 8 W/(m K)

(FeCrAl23.15) und 390 W/(m K) (Cu). Um den Einfluss der Art des Feststoffes aus der Darstellung – zumindest teilweise – zu eliminieren, wird die effektive Wärmeleitfähigkeit der Metallschäume auf die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes bezogen und dies ist in den Abbildungen 4.2 und 4.3 dargestellt.

In beiden Abbildungen sind neben den Messwerten verschiedener Autoren auch die Linien $\lambda_{eff,\parallel}/\lambda_F$ und $\lambda_{eff,\perp}/\lambda_F$ abgebildet. $\lambda_{eff,\perp}$ entspricht nach der Modellvorstellung von *Wiener [85]* der Untergrenze der effektiven Wärmeleitfähigkeit, welche durch Reihenschaltung der Wärmeleitung durch Feststoff und Gas erreicht wird. Sie fällt bei der bezogenen Wärmeleitfähigkeitsdarstellung bei Porositäten $> 2\%$ nahezu mit der x-Achse zusammen, wenn Luft in den Poren ist. Die Parallelschaltung $\lambda_{eff,\parallel}$ ergibt die obere Grenze für die effektive Wärmeleitfähigkeit. Für die Reihenschaltung wird folgende Gleichung eingesetzt:

$$\lambda_{eff,\perp} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\lambda_G} + \frac{1-\varepsilon}{\lambda_F}}, \quad (4.3)$$

dabei gilt für $\lambda_G \ll \lambda_F$ und $\varepsilon > 0,02$

$$\frac{\lambda_{eff,\perp}}{\lambda_F} = \frac{1}{\frac{\lambda_F}{\lambda_G} \varepsilon + (1-\varepsilon)} \rightarrow 0. \quad (4.4)$$

Für die Parallelschaltung ist folgende Gleichung gültig:

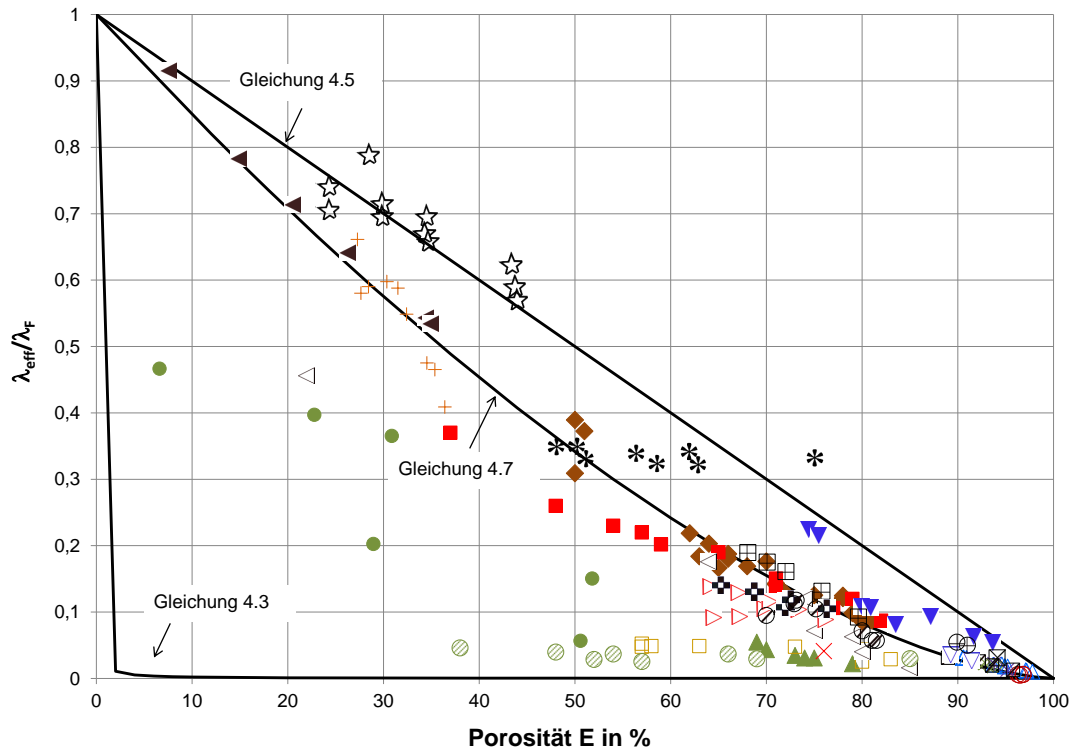
$$\lambda_{eff,\parallel} = \varepsilon \lambda_G + (1-\varepsilon) \lambda_F. \quad (4.5)$$

Für $\lambda_G \ll \lambda_F$ ergibt sich

$$\frac{\lambda_{eff,\parallel}}{\lambda_F} = \varepsilon \frac{\lambda_G}{\lambda_F} + (1-\varepsilon) \rightarrow (1-\varepsilon). \quad (4.6)$$

Fast alle dargestellten Messwerte liegen sinnvoll zwischen diesen beiden Grenzkurven. Die Kupfer-Struktur (*Ogushi u. a. [54]*) vom so genannten „Lotus“-Typ stellt wegen ihres speziellen Aufbaus eine Besonderheit dar. Bei dieser Struktur wurden die kreisförmige Poren gebohrt und verlaufen parallel zueinander gerade durch die Probe hindurch. Wenn der Wärmestrom parallel zu den Poren verläuft, werden exakt die Bedingungen des Modells für die Parallelschaltung erfüllt, so dass die Messwerte nahezu auf der oberen Grenze $\lambda_{eff,\parallel}$

zu finden sind. Für den Fall, dass der Wärmestrom senkrecht zu den Poren verläuft, entspricht diese Anordnung wegen durchgängiger Feststoffpfade des Kupfer-Materials auch im senkrechten Fall nicht der Modellannahme der Reihenschaltung.



geschlossenzellige:	▲ Al [1];	* Al [73];	◆ AlSi7 [70];
	■ AlSi7 [71];	● AlMg Leg.[43];	▼ Zn [71];
	▲ Mg (AZ91) [69];		
offenzellige:	◁ Cu [78];	☆ Cu-Lotus [54];	+ Cu-Lotus ⊥ [54];
	× Mg [38];	⊠ Mo [58, 59];	□ Ni Leg. [25];
	◌ Ni Leg. [44];	▽ Ni(Inconel) [82];	◇ NiCrAl [22];
	△ Al Leg. [17, 12];	⊞ Al Leg. [55];	▷ AlSi9Cu3 [50];
	⊕ AlSi9Cu3 TPS(t) [51];	⊞ AlSi9Cu3 P(s) [51];	○ Al99.7 [11];
	* FeCr Leg. [21];	○ FeCr Leg. [20];	⊕ CrNiMo [58, 59]

Abb. 4.2: Effektive Wärmeleitfähigkeit der Metallschäume bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes bei Raumtemperatur

Bei der Analyse der Abbildung 4.2 ist die Abnahme der Wärmeleitfähigkeit mit steigender Porosität genauso zu erkennen wie in der Abbildung 4.1. Aber trotz Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials streuen die dargestellten Messwerte stark. Dabei ist es nicht möglich, eindeutige Tendenzen zwischen offenzelligen und geschlossenzelligen Strukturen zu erkennen. Die Werte von AlSi9Cu3 mit offenen Poren von *Nestler u. a. [51]* liegen z. B. in der Nähe der Werte von AlSi7 mit geschlossener Porosität aus den Arbeiten

von (*Solorzano u. a. [70, 71]*). Im Gegensatz dazu weisen die Messungen anderer Autoren (z. B. *Kitazono [43]* und *Abramenko u. a. [1]*) für Werkstoffe mit geschlossener Porosität deutlich geringere Werte auf.

Solorzano u. a. [72] folgern aus der Literaturwerten und eigenen Messungen, dass die Wärmeleitfähigkeit von metallischen Strukturen ganz offensichtlich überwiegend durch die Porosität bestimmt wird. Der Einfluss der Struktur (offenzellig oder geschlossenzellig) ist nach Meinung der Autoren bei Schäumen aus gut leitenden Metallen (Mg, Al, Cu) zu vernachlässigen. Aus diesem Grund wird in *Solorzano u. a. [72]* eine Ausgleichskurve in der bezogenen Darstellung durchgezogen, die durch folgende Gleichung wiedergegeben wird:

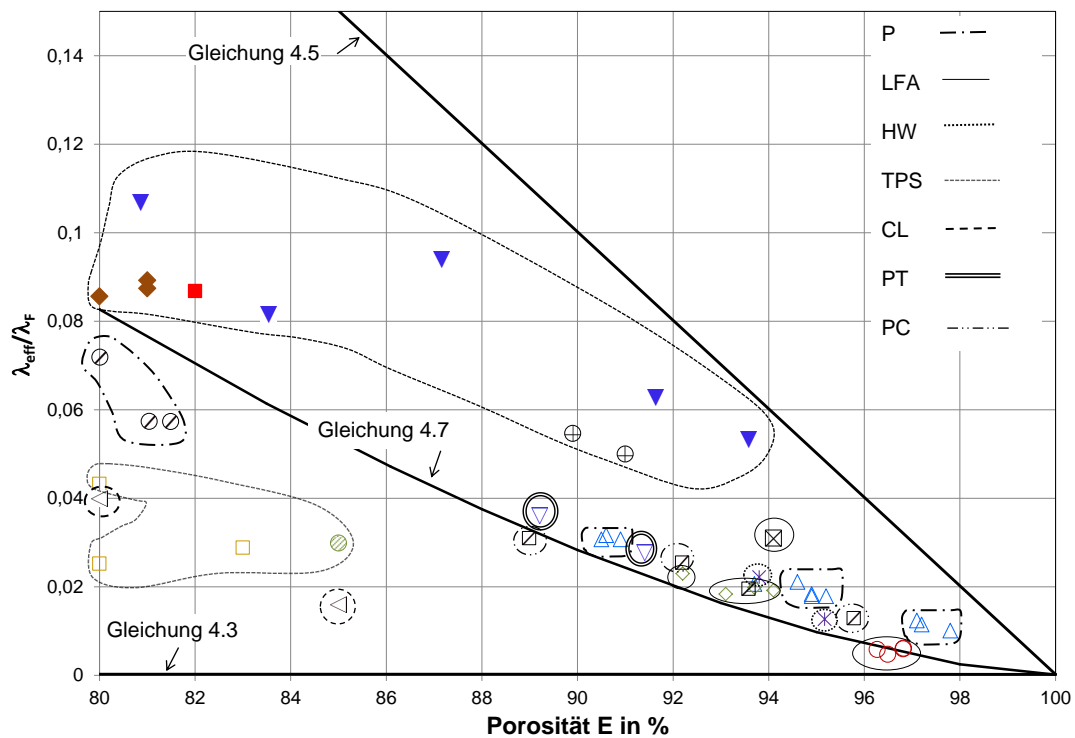
$$\lambda_{eff} = \lambda_G \varepsilon + \lambda_F (1 - \varepsilon)^{1,55}. \quad (4.7)$$

Diese Funktion ist so beschaffen, dass der Beitrag des Feststoffes gegenüber Gleichung 4.5 etwas reduziert ist. Der Verlauf ist in der Abbildung 4.2 mit angegeben. Bei Betrachtung der Messwerte anderer Autoren zeigt sich, dass es zum Teil eine gute Übereinstimmung damit gibt (z. B. *Calmidi und Mahajan [17]*, *Vicente u. a. [82]*), aber auch sehr große Abweichungen selbst bei Strukturen mit guter Feststoffleitung (z. B. *Abramenko u. a. [1]*, *Kitazono [43]*). Die Messungen ergeben im Vergleich teilweise deutlich geringere Werte.

Außer im Typ der Struktur (geschlossenzellige oder offenzellige) unterscheiden sich die Metallschäume in den Herstellungsmethoden und demzufolge in der zellularen Struktur selbst. Es gibt regelmäßige und unregelmäßige Strukturen, Strukturen mit dicken und dünnen Stegen, mit hochporösen und dichten Stegen, Strukturen mit verschiedenen Zellformen usw. In der Arbeit von *Solorzano u. a. [72]* wird dem konkreten Aufbau der zellularen Struktur eine viel geringere Rolle zugeordnet als z. B. der relativen Dichte (Porosität). Ob die Struktureigenschaften tatsächlich nahezu keine Bedeutung haben, ist fraglich, weil die Anordnung der festen und gasförmigen Phasen nach den Plattenmodellen von *Wiener [85]* einen direkten Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit hat.

In Abbildung 4.3 sind die Messwerte im Porositätsbereich oberhalb 80 % noch einmal gesondert dargestellt. Auf diesen Bereich soll im Detail eingegangen werden, da dort auch die eigenen Untersuchungen einzuordnen sind. Außerdem sollen in dieser Darstellung die eingesetzten Messverfahren bewertet werden.

Alle Messungen für geschlossenzellige Strukturen in diesem Porositätsbereich wurden von *Solorzano u. a. [70, 71]* mit dem TPS-Verfahren durchgeführt. Die offenzelligen Strukturen wurden dagegen von verschiedenen Autoren, mit verschiedenen Messmethoden und für



geschlossenzellige:	◆ AlSi7 [70];	■ AlSi7 [71];	▼ Zn [71];
offenzellige:	◁ Cu [78];	× Mg [38];	⊠ Mo [58, 59];
	◻ Ni Leg. [25];	◌ Ni Leg. [44];	▽ Ni(Inconel) [82];
	◊ NiCrAl [22];	△ Al Leg. [17, 12];	⊞ Al Leg. [55];
	◻ AlSi9Cu3 [50];	○ Al99.7 [11];	* FeCr Leg. [21];
	○ FeCr Leg. [20];	⊕ CrNiMo [58, 59]	

Abb. 4.3: Effektive Wärmeleitfähigkeit der Metallschäume bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes bei Raumtemperatur im Porositätsbereich ab 80 %

verschiedenste Grundmaterialien untersucht. Die Mehrheit der Messwerte solcher Strukturen liegt in der Nähe der Linie der Modellgleichung 4.7. Dabei passen einzelne Werte (wie z. B. FeCr Legierung [20] und Al Legierung [55]) gut zu diesem Modell. Die Messwerte, die mit der TPS- oder mit der CL-Methode bestimmt wurden, liegen deutlich oberhalb oder unterhalb dieser Gerade. Es ist zu vermuten, dass der Grund dafür bei den TPS-Messergebnissen die Oberflächenpräparation ist. In der Literatur (*Fend u. a. [25]*, *Sauerhering und Reutter [63]*, *Laschet u. a. [44]*) gibt es nur die Bemerkung, dass der Kontakt ausreichend genug war zur Realisierung des Wärmeflusses vom Sensor in die Probe. Wie genau die Kontaktierung hergestellt wurde, dazu gibt es keine Information. Außerdem wurden die untersuchten offenzelligen Metallschaumstrukturen, die von *Fend u. a. [25]* mit der TPS-Technik untersucht wurden, mit der SlipReaction-Foam-Sintering-

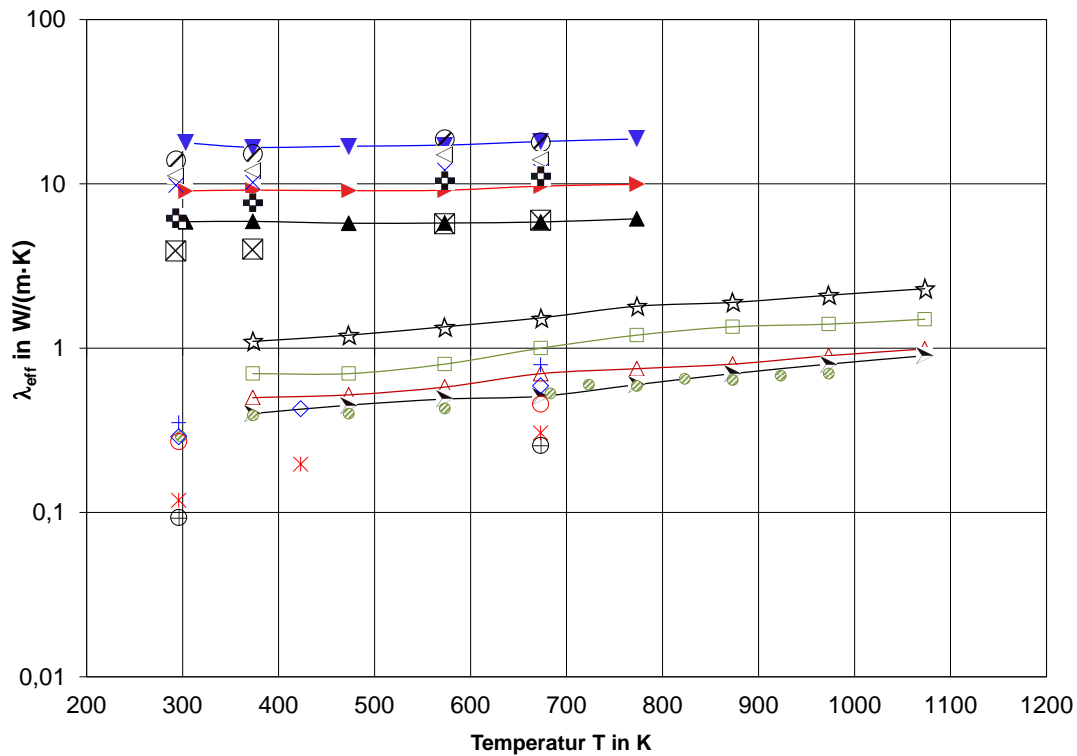
Methode hergestellt und dabei sind Poren in verschiedenen Größen entstanden. Wie viele Poren vom Hot-Disk-Sensor abgedeckt wurden, ist ebenfalls eine offene Frage. Bei den anderen offenzelligen Strukturen scheint die Herstellungsmethode keinen Einfluss zu haben. In der Abbildung 4.3 ist es schwierig festzustellen, ob es einen Einfluss des Types der Struktur (offenzellige oder geschlossenzellige) auf die Wärmeleitfähigkeit gibt und wo die richtigen Werte liegen. Aus den dargestellten Abbildungen ist zu erkennen, dass weitere Untersuchungen im Bereich der Porosität 80 – 100 % notwendig und wichtig sind.

4.3.2 Einfluss der Temperatur

In Abbildung 4.4 sind Messwerte für die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur im Überblick dargestellt. Die eingesetzten Messverfahren können in der Tabelle (4.1) eingesehen werden. In der Arbeit von *Babcsan u. a. [6]* wurde die Wärmeleitfähigkeit von Aluminiumschäumen mit geschlossener Porosität bestimmt. Abbildung 4.4 zeigt die dabei ermittelten Kurven mit verschiedener Porosität und verschiedener Porengröße bei Normaldruck in Luftatmosphäre. Alle diese Kurven zeigen einen Anstieg der Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur.

Bei niedriger Porosität und kleiner Porengröße ist die Wärmeleitfähigkeit höher. Die Ergebnisse in *Babcsan u. a. [6]* lassen die Vermutung zu, dass der Einfluss der Porosität im gesamten Temperaturbereich gegenüber dem Einfluss der Porengröße dominiert. Die Betrachtung der Porengröße allein ergibt keine logische Zuordnung, ihr Einfluss ist vermutlich zu vernachlässigen. Zusätzlich zu den dargestellten Messungen wurde in der Arbeit von *Babcsan u. a. [6]* bei einer geschlossenen Porosität von 93 % auch die Wärmeleitfähigkeit im Vakuum bestimmt. In Luft beträgt die Wärmeleitfähigkeit der Al Schäume 6,14 W/(m K) und in Vakuum 6,20 W/(m K) bei circa 773 K, so dass der Unterschied mit 1 % im Rahmen der Messgenauigkeit liegt. Vermutlich sind die Zellwände so dicht, dass die Füllung der Poren im Vakuum sich nicht ändert. Bei *Babcsan u. a. [6]* wurde bemerkt, dass die Konvektion in den Poren der Aluminiumschäume vernachlässigbar ist. Außerdem wurde dabei vermutet, dass die Strahlung bis 773 K keinen wesentlichen Einfluss hat.

Weiterhin werden in Abbildung 4.4 Messwerte von *Degischer und Kriszt [24]* ebenfalls für Schäume mit geschlossener Porosität aus einer Al-Legierung dargestellt. Bei diesen Messungen steigen bei einigen Legierungen die Werte mit zunehmender Temperatur kontinuierlich an. Bei anderen nimmt die Wärmeleitfähigkeit oberhalb von 573 K wieder etwas ab. Als Ursache wird von den Autoren vermutet, dass bei der Messung Wärmeverluste durch Strahlung aufgetreten sind. In Abbildung 4.4 werden weiterhin die Kurven für FeCrAl23.15 und Ni₃Al dargestellt aus der Arbeit von *Andersen u. a. [4]*. Dabei handelt



geschlossenzellige:

▼ Al, $E = 83\%$, $d_{por} = 1,5\text{ mm}$ [6];

► Al, $E = 91\%$, $d_{por} = 2,5\text{ mm}$ [6];

▲ Al, $E = 93\%$, $d_{por} = 2\text{ mm}$ [6];

offenzellige:

⊙ AlMgSi0.6, $E = 81\%$ [24];

◁ AlMgSi0.6, $E = 85\%$ [24];

⊞ AlSi12, $E = 83\%$ [24];

⊠ AlSi12, $E = 88\%$ [24];

⊗ Al 99.6, $E = 88\%$ [24];

+ NiCrAl, $E = 92\%$, $d_{por} = 2,8\text{ mm}$ [22];

◇ NiCrAl, $E = 94\%$, $d_{por} = 1,4\text{ mm}$ [22];

○ NiCrAl, $E = 94\%$, $d_{por} = 1,2\text{ mm}$ [22];

⊕ FeCrAl, $E = 96\%$, $d_{por} = 0,3\text{ mm}$ [22];

* FeCrAl, $E = 97\%$, $d_{por} = 0,4\text{ mm}$ [22];

□ FeCrAl23.15, $E = 70\%$ [4];

△ FeCrAl23.15, $E = 90\%$ [4];

☆ Ni₃Al, $E = 70\%$ [4];

➤ Ni₃Al, $E = 90\%$ [4];

⊙ Ni-Leg., $E = 85\%$ [44];

Abb. 4.4: Effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

es sich um faserförmige Metallstrukturen mit offener Porosität. In diesem Artikel werden die Werte der Wärmeleitfähigkeit der porösen Strukturen mit den Werten des Grundmaterials ohne Porosität verglichen, die 8 W/(m K) für FeCrAl23.15 und 20 W/(m K) für Ni₃Al betragen. Die Schäume beider Grundmaterialien zeigen die erwartete Verringerung der Wärmeleitfähigkeit mit steigender Porosität und einen Anstieg mit steigender Temperatur. Die Wärmeleitfähigkeit verdoppelt sich etwa im Temperaturbereich von $373,15\text{ K}$ bis $1073,15\text{ K}$. Die Autoren führen dies auf das Einsetzen von Konvektion zurück.

Während bei der Porosität von 70 % die Ni_3Al -Schäume mit höherer Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials erwartungsgemäß eine höhere effektive Wärmeleitfähigkeit liefern, sind die Messergebnisse bei 90 % Porosität geringer als die der FeCrAl-Schäume. Diese teilweise widersprüchlichen Ergebnisse werden von den Autoren nicht kommentiert. Abbildung 4.4 zeigt ebenfalls eine Kurve von Inconel 625 mit einer Gesamtporosität von 85 % (*Laschet u. a. [44]*). Diese Gesamtporosität unterteilt sich in eine primäre Porosität von 68 % mit der Porengröße von 1 – 3 mm und eine sekundäre Porosität des Matrixmaterials von 55 % mit der Porengröße $20\text{ }\mu\text{m}$. Neben der dargestellten Messung wurde die Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials mit der sekundären Porosität gesondert ermittelt. Diese Messwerte von Inconel 625 sind daher nicht direkt vergleichbar mit den anderen, die in Abbildung 4.4 dargestellt sind, weil bei den anderen Materialien der Einfluss der Gesamtporosität ohne Verteilung in primäre und sekundäre Porosität analysiert wurde.

Auch *Coquard u. a. [22]* präsentieren Messwerte von NiCrAl und FeCrAl bei verschiedenen Temperaturen. Der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit wird auf den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials zurückgeführt, da sich die Struktur nicht verändert. Weiterhin werden Einzelmesswerte von NiCrAl und FeCrAl bei erhöhten Temperaturen angegeben. Die Messpunkte der NiCrAl-Schäume (Porosität 94 %) liegen dabei auf der Messkurve von Ni_3Al (Porosität 90 %, *Andersen u. a. [4]*), d. h. die Porosität beider Strukturen unterscheidet sich nur um 4 %. In der Arbeit von *Coquard u. a. [22]* wird weiterhin der Extinktion-Koeffizient der Metallschäume analysiert. Dabei wird bemerkt, dass der Zelldurchmesser einen großen Einfluss auf die Strahlungsprozesse hat. Dabei spielt die Porosität eine deutlich geringere Rolle. Das ist an den Werten von NiCrAl mit dem Porendurchmesser 2,8 mm mit der Porosität 92 % zu erkennen, die höher liegen als die Werte der Struktur mit einem Porendurchmesser von 1,4 mm und der Porosität 94 %. Außerdem wurde bei *Coquard u. a. [22]* bei offenzelligen FeCrAl Strukturen bemerkt, dass die Morphologie der Strukturen eine ganz wichtige Rolle spielt und dadurch unerwartete Werte auftreten können.

Bei der gemeinsamen Analyse aller Messwerte in Abbildung 4.4 ergeben sich die höchsten Werte der Wärmeleitfähigkeit bei Al-Schäumen (*Babcsan u. a. [6]*), weil die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes nach (*Solorzano u. a. [71]*, *Abramenko u. a. [1]*) 150-160 W/(m K) beträgt. Niedriger liegen die Messwerte von Ni_3Al und FeCrAl23.15 von *Andersen u. a. [4]* mit der Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes von 20 W/(m K) bzw. 8 W/(m K). Die Messwerte der Ni-Legierung (Inconel, *Laschet u. a. [44]*) liegen noch weiter unten bei einer Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes von 9,8 W/(m K). Die niedrigsten Werte haben Strukturen aus NiCrAl und FeCrAl (*Coquard u. a. [21, 22]*). Die entsprechenden Wärmeleitfähigkeiten der Feststoffe betragen 13,4 W/(m K) und 16 W/(m K). Beim Vergleich muss

berücksichtigt werden, dass sich alle Strukturen in der Morphologie stark unterscheiden. Es gibt die Faserstrukturen (Ni_3Al , FeCrAl , *Andersen u. a. [4]*), Schäume mit geschlossener Porosität (Al , *Babcsan u. a. [6]*) und Schäume mit offener Porosität (Ni -Legierung, *Laschet u. a. [44]*). Es ist noch nicht klar, welche Größenordnung der Wärmeleitfähigkeit bei welcher Struktur, mit welcher Porenabmessung und bei welcher Porosität zu erwarten ist.

Verschiedene Autoren haben nicht nur den Einfluss der Porosität und der Temperatur, sondern auch den des Druckes analysiert. In Abbildung 4.5 wird die Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Drücken für Ni -Schäume (*Sullins und Daryabeigi [77]*) und für FeCrAlY -Schäume (*Zhao u. a. [88]*) dargestellt. Alle Kurven der offenzelligen Metallschäume aus FeCrAlY steigen bei Erhöhung der Temperatur, besonders stark im Temperaturbereich von 500 – 800 K. Die Ursachen dafür sind die steigende Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials und der Einfluss der Strahlung (*Zhao u. a. [88]*), die bei höheren Temperaturen den Wärmetransport dominiert. Bei Raumtemperatur ist die Strahlung zu vernachlässigen und die Wärmeleitfähigkeit wird allein durch das Feststoffgerüst bestimmt. Beim Vergleich der Kurven von FeCrAlY in Abbildung 4.5 ist zu erkennen, dass die Wärmeleitfähigkeit größer wird mit abnehmender Porosität und bei größeren Poren. Die Messwerte von FeCrAlY -Schaum bei atmosphärischem Druck liegen höher als die Messwerte im Vakuum, wobei dies von den Autoren auf das Einsetzen der natürlichen Konvektion zurückgeführt wurde. Bei der Untersuchung der offenzelligen Ni -Schäume (*Sullins und Daryabeigi [77]*) steigt der Anteil der Luftwärmeleitfähigkeit in den porösen Strukturen bei Erhöhung des Druckes. Wenn man die Messkurven der Ni -Schäume (*Sullins und Daryabeigi [77]*) und der FeCrAlY -Schäume (*Zhao u. a. [88]*) vergleicht, so ist der Unterschied zwischen den Messwerten in Vakuum und bei atmosphärischem Druck bei den FeCrAlY -Schäumen viel größer als bei den Ni -Schäumen. Außerdem wurden die Messungen in Luft durchgeführt und bei *Sullins und Daryabeigi [77]* dagegen in Stickstoff. Die Stickstoffatmosphäre wurde genommen, um die Oxidbildung zu vermeiden. Nach *Sullins und Daryabeigi [77]* haben die Oxide einen direkten Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. *Andersen u. a. [4]* haben speziell den Oxidationswiderstand bei 1373 K in Luft mit einer Aufenthaltszeit von 1000 Stunden analysiert. Auch bei den Untersuchungen von *Degischer und Kriszt [24]* wurde vermutet, dass es auf Grund der weitergehenden Oxidation auf der Oberfläche der Metallschäume bei höheren Temperaturen zur Senkung der Wärmeleitfähigkeit kommen kann. Dabei wurde für AlSi12 -Legierungen (*Degischer und Kriszt [24]*) festgestellt, dass die Wärmeleitfähigkeit der AlSi12 -Schäume mit geringerer Empfindlichkeit für Oxidbildung bei höheren Temperaturen leicht sinkt. Dagegen wurde bei *Zhao u. a. [88]* die Oxidbildung bei höheren Temperaturen nicht untersucht. Wie groß der Einfluss der Oxidbildung auf die Wärmeleitfähigkeit der porösen Strukturen tatsächlich ist und ob er unbedingt berücksichtigt

werden muss, ist eine offene Frage.

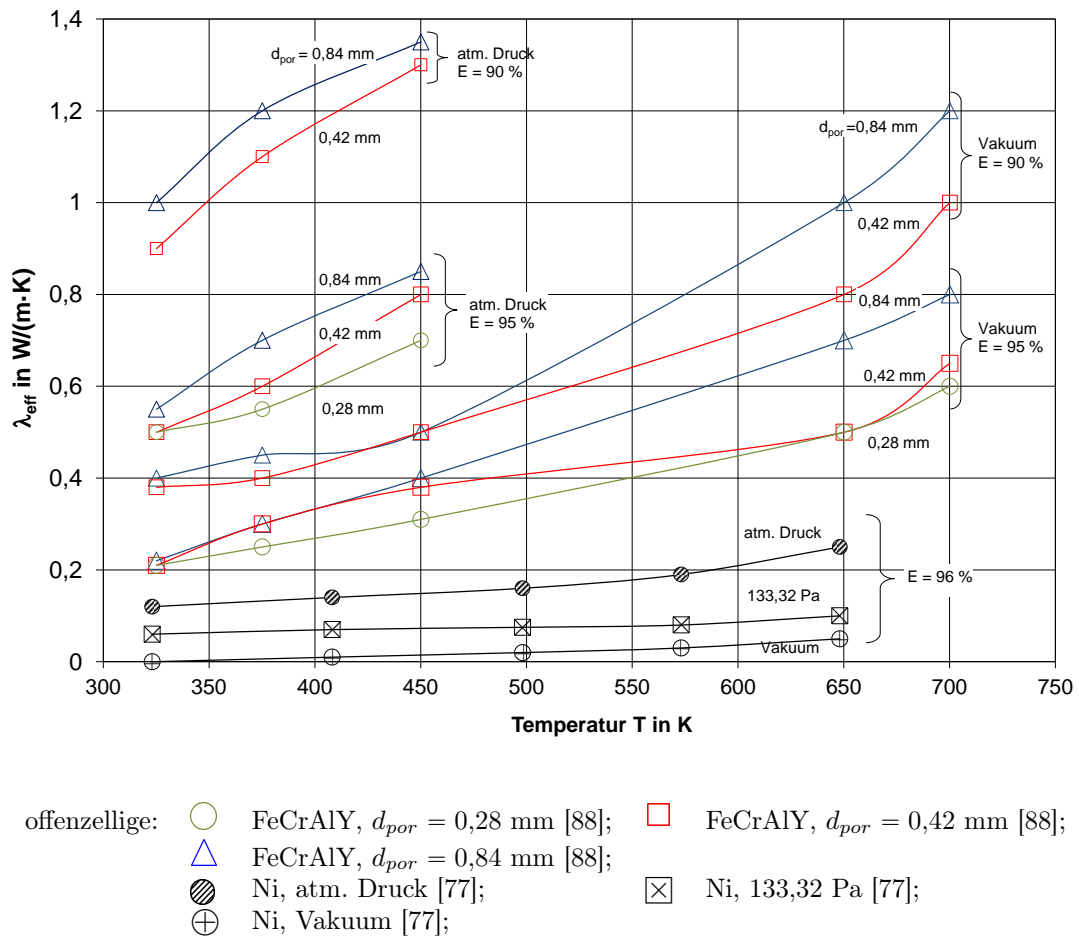


Abb. 4.5: Effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Temperatur, Porosität und Druck

Betrachtet man Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 im Vergleich, so ist zu erkennen, dass die Ergebnisse widersprüchlich sind. Die Wärmeleitfähigkeitswerte der porösen Strukturen aus FeCrAl (*Coquard u. a. [21, 22]*) mit der Porengröße 0,3 mm liegen bei nahezu gleicher Porosität im gesamten Temperaturbereich unterhalb der Messwerte für die Porengröße 0,4 mm (Abbildung 4.4). Dagegen zeigt die Wärmeleitfähigkeit der Schäume aus FeCrAlY und Ni (Abbildung 4.5) nahe zu keinen Porengrößeneinfluss bei niedrigen Temperaturen. Bei hohen Temperaturen steigt die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Porengröße. Dieser Effekt ist auf die Strahlung zurückzuführen.

4.4 Mathematische Modelle

Die Literaturanalyse zur experimentellen Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit zeigt, wie schwierig, komplex und aufwändig die Messungen sind und mit welchen Kosten sie oftmals verbunden sind. Um diesen Aufwand zu reduzieren und mit möglichst wenigen Messungen auszukommen, haben sich viele Autoren neben der Messung auch mit der Formulierung von mathematischen Modellen beschäftigt.

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, wird der Wärmetransport in zellularen Strukturen durch mehrere Transportmechanismen bestimmt. Aus diesem Grund sind alle Berechnungsmodelle, die die effektive Wärmeleitfähigkeit am besten charakterisieren, sehr komplex. Der erste wichtige Mechanismus ist die Wärmeleitung durch Feststoffgerüst und Gas. *Schlünder und Tsotsas [65]* geben eine allgemeine Definition von Modelltypen für diesen Wärmetransportmechanismus und Gleichungen speziell für Schüttungen an. Es ist möglich, die existierenden Modelle für die zellularen metallischen Strukturen (geschlossenzellige, offenzellige) diesen Modelltypen zuzuordnen.

Zum Typ I gehört die exakte Berechnung des Temperaturfeldes. Als Grundlage wird die Laplace-Gleichung für die Wärmeleitung in den Partikeln und im Fluid verwendet:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0. \quad (4.8)$$

Dabei wird unter definierten Randbedingungen das Temperaturfeld nach Gleichung 4.8 bestimmt und anschließend mit Hilfe des Fourierschen Grundgesetzes nach Gleichung 3.1 die Wärmeleitfähigkeit ermittelt.

Für dieses Modell gibt es zwei Lösungswege: analytisch oder numerisch. Die wichtigste Voraussetzung dazu ist, dass die Gestalt der modellierten Struktur bekannt sind. Eine vereinfachte analytische Lösung hat *Maxwell [47]* im Jahr 1873 entwickelt:

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_G} = \frac{1 + 2\phi}{1 - \phi} \quad (4.9)$$

mit

$$\phi = (1 - \varepsilon) \frac{\lambda_F/\lambda_G - 1}{\lambda_F/\lambda_G + 2}. \quad (4.10)$$

Dabei wurde angenommen, dass die Kugeln der Schüttungen sich nicht gegenseitig stören. Typ II ist die Ersatzschaltung von Einzelwiderständen. Die ersten und einfachsten Modelle dieser Arbeit sind die Plattenmodelle, welche von *Wiener [85]* formuliert und schon oben präsentiert wurde (Gleichungen 4.3, 4.5). Die Kombination aus Reihenschaltung und Parallelschaltung ist in der Abbildung 4.6 dargestellt:

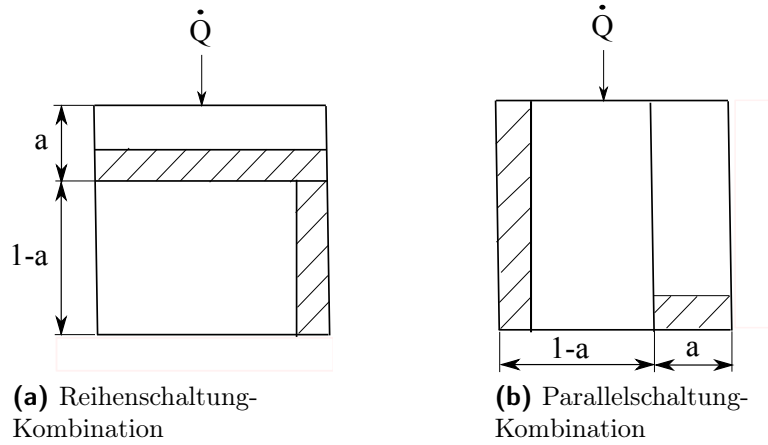


Abb. 4.6: Widerstandsmodelle: Kombination aus Reihenschaltung und Parallelschaltung

Sie ergibt folgende Gleichungen für die Reihenschaltung Kombination:

$$\lambda_{eff} = \frac{1}{\frac{a^*}{\lambda_{eff,\perp}} + \frac{1-a^*}{\lambda_{eff,\parallel}}} \quad (4.11)$$

und für die Parallelschaltung Kombination:

$$\lambda_{eff} = (1 - a^*) \lambda_{eff,\parallel} + a^* \lambda_{eff,\perp}. \quad (4.12)$$

Dabei wird der Strukturparameter a^* an Versuchsdaten angepasst.

Typ III ist die Darstellung (der Schüttungen) als eine Einheitszelle. Dabei werden parallele Wärmestromlinien (Typ IIIa) oder parallele Isothermen (Typ IIIb) verwendet. Beide Fälle sind nicht exakt, im praktischen Gebrauch hat sich der Typ IIIa als beste Variante erwiesen. Zu diesem Modelltyp gehört das Modell von Zehner und Bauer (*Schlünder und Tsotsas [65]*, VDI Wärmeatlas [80]) für Schüttstoffe. Die Einheitszelle ist dabei ein zylindrischer Kern mit zwei gegenüberliegenden Partikelhälften und mit einer zylindrischen Schale, die mit Fluid gefüllt ist. Eine kubische Einheitszelle mit einheitlicher Wanddicke verwendet das Modell von Russell aus der Arbeit von *Collishaw und Evans [19]*.

Einen Überblick der Modelle nur für den Leitungsmechanismus in geschlossenzelligen metallischen Strukturen geben *Solorzano u. a. [70]*. Dabei wurden auch oftmals Vereinfachungen für die Modelle dargestellt. Die Ergebnisse der Modelle wurden mit den eigenen Messergebnissen verglichen. Am besten passte das Modell von *Bruggeman [16]* zu den gewonnenen Wärmeleitfähigkeitswerten (siehe Kapitel 7.4.2). Speziell für metallische Hohlkugelstrukturen präsentieren *Fiedler u. a. [26]* eine numerische Simulation und ein analytisches Modell der Wärmeleitfähigkeit.

Der Wärmetransport in offenzelligen metallischen Strukturen wird auf Grund der ähnlichen Struktur in gleicher Weise wie in keramischen zellularen Strukturen modelliert. Bei der Literaturanalyse wurden zahlreiche Modelle gefunden. Einen Überblick solcher Modelle für die Wärmeleitung durch Feststoffgerüst und Gas präsentieren *Coquard u. a. [23]*. Für die Modellierung wird oft Typ II (Ersatzschaltung von Einzelwiderständen) oder Typ III (Betrachtung als eine Einheitszelle) verwendet. Die offenzelligen hochporösen Materialien, die in der Arbeit von *Coquard und Baillis [20]* numerisch untersucht wurden, sind mit solchen Einheitszellen modelliert, deren Geometrie sich durch Tetradekaeder (*Boomsma und Poulidakos [15]*) oder einer zweidimensionalen Anordnung von hexagonalen Zellen (*Bhattacharya u. a. [12]*, *Calmidi und Mahajan [17]*) beschreiben lässt.

Für Faserstrukturen ist es möglich, das Modell von *Vnukov u. a. [83]* zu verwenden. Die Autoren haben Glas-Faserstrukturen modelliert. Dabei wurde der Typ II (Ersatzschaltung von Einzelwiderständen) erweitert, so dass zwei Reihenschaltungen und eine Parallelschaltung miteinander kombiniert werden. Das nächste verwendete Modell ist das *Dulnev-Modell*, das erfolgreich für Faserstrukturen in der Arbeit von *Veyhl u. a. [81]* eingesetzt wurde. Dieses Modell gehört zum Typ III und dabei wird eine kubische Einheitszelle verwendet.

Der zweite wichtige Wärmetransportmechanismus ist die Strahlung. Wenn man auf Grund der Struktur die Strahlung als lokales diffusives Problem beschreiben kann, ist Gleichung 3.18 anwendbar. Die Strahlungsleitfähigkeit λ_{str} kann dann z. B. nach Gleichung 3.16 berechnet werden. Das setzt jedoch die Kenntnis des Extinktionskoeffizienten voraus, dessen Bestimmung *Glicksman [29]* für Polyurethanschäume im Detail beschreibt. *Loretz u. a. [45]* bestimmen Extinktionskoeffizienten für verschiedene Schaumstoffe theoretisch und experimentell. Dabei stellen sie fest, dass die Strahlungseigenschaften von Polyurethan-, Polystyrol- oder Karbon-Schäumen nicht vergleichbar sind mit denen der Metallschäume. Bei den zellularen metallischen Strukturen kann man die Reflexion nicht vernachlässigen. Außerdem finden sie eine starke Abhängigkeit der Extinktion von der Morphologie der Schäume.

Neben Strahlungsmodellen, die sich streng an den physikalischen Phänomenen orientieren, finden sich aber auch rein empirische Ansätze. Dazu zählt das Modell von *Zhao u. a. [88]*, in dem der Strahlungsterm mit der Gleichung

$$\lambda_{str}(T) = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 \quad (4.13)$$

bestimmt wird. Dabei sind C_0, C_1, C_2, C_3 die Anpassungsparameter an die Messwerte, so dass dieses Modell nur für bestimmte Temperaturbereiche gültig und nicht extrapolierbar ist. *Zhao u. a. [88]* bestimmten die effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Porosität, Porengröße, Temperatur und Druck. Fragwürdig ist, dass die oben genannten Anpassungsparameter ohne erkennbares System sehr verschiedene Größen und Vorzeichen besitzen. *Coquard u. a. [23]* analysierten die Modelle im Bereich von höheren Temperaturen und stellten fest, dass die Kenntnis von mikroskopischen, strukturellen und physikalischen Eigenschaften Grundvoraussetzung ist.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die wichtigsten Größen für die Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der konkrete Aufbau der zellularen Struktur und die Form der Zellen, die Porosität und die thermophysikalischen Eigenschaften des Grundmaterials und des Fluids sind. Im Kapitel 7 werden ausgewählte Modelle noch einmal im Detail erläutert und die Gleichungen angegeben. Dann werden die mit diesen Modellen berechneten effektiven Wärmeleitfähigkeiten mit den Messdaten der geschlossenzelligen und offenzelligen Metallschäume verglichen und bewertet.

4.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Kapitel wurde eine Analyse der bisher veröffentlichten experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von zellularen metallischen Strukturen dargestellt. Die Messung der Wärmeleitfähigkeit von Metallschäumen ist aufgrund des sehr großen Bereiches der zu erwartenden Werte und der speziellen Struktur mit großen Schwierigkeiten verbunden. Neben der Porosität und teilweise großen Porenradien bei unregelmäßiger Struktur sind auch die elektrische Leitfähigkeit und die hohe Festigkeit des Matrixmaterials begrenzende Faktoren für die Anwendbarkeit vieler Messverfahren. Messungen wurden bisher mit sehr unterschiedlichen stationären und instationären Verfahren, zum Teil bei spezieller Probenpräparation durchgeführt. Das TPS-Verfahren hat sich dabei als eine der erfolversprechendsten Varianten herausgestellt, weil durch den

flächigen Sensor eine größere Oberfläche abgedeckt wird. Das verbessert die Chancen, tatsächlich für die gesamte Struktur repräsentative Messwerte der thermophysikalischen Eigenschaften zu erhalten. Bei der Anwendung verschiedener Messverfahren fehlt noch eine Analyse, welche Probenpräparation und welche Maßnahmen zur optimalen Durchführung der Messungen für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit der zellularen metallischen Strukturen notwendig sind.

Die Wärmeleitfähigkeit wurde in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter untersucht. Die wichtigsten sind die Porosität, die Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials und die Temperatur sowie die Größe und Art der Poren (offen oder geschlossen). Bei vielen Autoren stand dabei offenbar die Charakterisierung eines speziellen Schaumstoffes im Mittelpunkt der Untersuchungen. Beim Vergleich der Messwerte verschiedener Autoren sind zum Teil gut übereinstimmende Ergebnisse, aber auch widersprüchliche Aussagen zu erkennen. Einige Tendenzen, wie zum Beispiel der Einfluss der offenen und geschlossenen Poren oder der Einfluss des Porendurchmessers bei Raumtemperatur kommen aus den bisherigen Messungen nicht klar zum Ausdruck. Messwerte bei höheren Temperaturen sind nur vereinzelt vorhanden. Es ist noch nicht klar, ab welcher Temperatur die Strahlung einen signifikanten Beitrag zur effektiven Wärmeleitfähigkeit leistet.

Neben der Durchführung von Messungen bieten mathematische Modelle die Möglichkeit, den Einfluss einzelner Parameter in großer Bandbreite zu analysieren. Die für Metallschäume durchgeführten Berechnungen stützen sich im Allgemeinen auf Widerstandsmodelle, die zur Berechnung poröser Strukturen häufig herangezogen werden. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Matrixmaterials ist der Bereich zwischen den Grenzfällen Parallel- und Reihenschaltung von Feststoff und Gas sehr groß. Oftmals wurden die Modelle für bestimmte untersuchte Materialien entwickelt und mit den Messwerten verglichen. Wenn die Messergebnisse aber unter Umständen bereits fehlerbehaftet sind, führt es dazu, dass die Modelle sich auf Informationen mit einem Fehleranteil stützen. Dies wirkt sich besonders auf empirische Faktoren aus, die dann nicht auf andere Anwendungen übertragbar sind.

Aus dieser Literaturanalyse lässt sich daher ableiten, dass die wärmetechnischen Eigenschaften von Metallschäumen bisher noch nicht ausreichend charakterisiert sind. Insbesondere sind weitere systematische Messungen der Wärmeleitfähigkeit bei gezielter Variation der einzelnen Einflussparameter notwendig. Sie sind auch die Basis für die Entwicklung und Validierung allgemein gültiger mathematischer Modelle zur Vorausberechnung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der konkreten Struktur. Vor allem aber sind sie die Grundlage für den gezielten und effektiven Einsatz von Metallschäumen für wärmetechnische Zwecke.

Aus der dargestellten Literaturanalyse lassen sich folgende Forschungsschwerpunkte festlegen:

- Verwendung und Vergleich verschiedener Messverfahren für gleiche Proben;
- Bestimmung der optimalen Probenpräparation;
- Erweiterung der Untersuchungen von Einflussparametern (Herstellung, Struktur, Temperatur);
- Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Strukturparametern und Messergebnissen;
- Bewertung vorhandener Modellansätze anhand der eigenen Messdaten.

5 Untersuchte Materialien

Poröse metallische Strukturen, die in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden, unterteilen sich in offenzellige, geschlossenzellige und Hohlkugelstrukturen, die bereits in der Abbildung 2.1 dargestellt sind. Die Porengröße der untersuchten Materialien wurde im Bereich 1 – 7,2 mm variiert und die Porosität liegt im Bereich von 80 – 96 %. Verschiedene Herstellungsmethoden wurden dabei eingesetzt, auf die in diesem Kapitel später genauer eingegangen werden.

5.1 Hohlkugelstrukturen

Die für die Untersuchungen ausgewählten Hohlkugelstrukturen (siehe Tabelle 5.1) wurden vom Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung Dresden (IFAM) und der Firma Hollomet GmbH Dresden (HO) hergestellt. Dabei wurden als Grundmaterialien verschiedene Metalle verwendet. Die Porosität liegt im Bereich zwischen 80 – 95 % und ihre Porengröße im Bereich zwischen 1,5 – 5,9 mm.

Tab. 5.1: Untersuchte Hohlkugelstrukturen

Material	λ_F (W/(m K))	E (%)	d_{por}^* (mm)	Hersteller
Fe	80	81	1,6	IFAM
		93	2,5	
Stahl 1.4841	15	93	3,8	
		95	4,6	
Stahl 1.4767	13	90	3,7	
Stahl 1.4404	15	94	1,5	
Stahl 1.4401	15	95	2,5	HO
Fe	80	89	3,1	
		90	2,9	
		90	5,9	

* Lichtmikroskopische Untersuchungen

5.1.1 Herstellung

Hohlkugelstrukturen sind die einzigen zellularen metallischen Strukturen, die aus zuvor erzeugten Einzelzellen hergestellt wurden. Die ausführliche Beschreibung zur Herstellungsmethode ist bei *Schatt u. a. [64]*, *Quadbeck [57]* und *Baumeister [9]* dargestellt. Ausgangsmaterial ist Metallpulver, das mit Binder und weiteren Zusätzen zusammen gemischt wird und dann als Metallpulver-Binder-Suspension vorliegt. Die Einzelzellen, so genannte „Grünkugeln“, entstehen durch die Beschichtung von Polystyrolkugeln mit der Metallpulver-Binder-Suspension, z. B. in einem Wirbelbettverfahren, wie es am IFAM in Dresden entwickelt wurde. In einem speziellen „Formteilautomaten“ können diese Grünkugeln mit Hilfe von Wasserdampf zu Formkörpern verklebt werden. Bei der folgenden Wärmebehandlung im Temperaturbereich zwischen 200 - 600 °C werden Polystyrol und Binder zu gasförmigen Kohlenstoffverbindungen zersetzt und entweichen aus den Formkörpern oder Einzelhohlkugeln. Diesen Prozess bezeichnet man auch als „Entbinderung“. Nach der Entbinderung erfolgt das Sintern der Formteile oder Einzelkugeln unter Wasserstoff-, Argon- oder Stickstoff-Atmosphäre bei Temperaturen von 1100 - 1300 °C, die damit ca. 80 % der Schmelztemperatur betragen. Beim Sintern verbinden sich die Metallpulverpartikel durch Diffusionsprozesse. Gesinterte Einzelhohlkugeln können anschließend miteinander verlötet oder mit Polymeren zu Strukturen verklebt werden. Das Schema der Herstellungsmethode wird in der Abbildung 5.1 präsentiert.

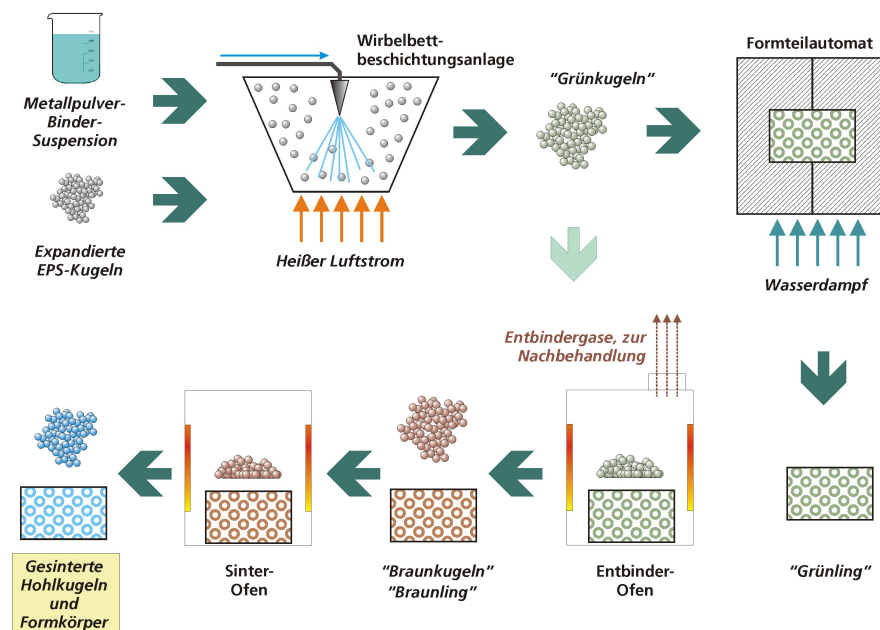


Abb. 5.1: Herstellung von Hohlkugelstrukturen [Quelle: IFAM]

5.1.2 Charakterisierung der Grundmaterialien

Für die Analyse der Zuverlässigkeit der gewonnenen Messergebnisse und den Vergleich mit der Literatur ist die Kenntnis der thermophysikalischen Eigenschaften des Grundmaterials sehr wichtig. Die untersuchten Hohlkugelstrukturen wurden aus Standardlegierungen hergestellt. Aus diesem Grund wurden die Eigenschaften der Grundmaterialien aus den Datenblättern (Anhang A.1) entnommen. Die wichtigsten Eigenschaften sind in der Tabelle 5.2 dargestellt.

Tab. 5.2: Thermophysikalische Eigenschaften der Grundmaterialien

Material	ρ (kg/m ³)	c_p (J/(kg K))	λ_F (W/(m K))
Fe	7874	449	80
Stahl 1.4841	7900	500	15
Stahl 1.4767	7200	460	13
Stahl 1.4404	7980	500	15
Stahl 1.4401	8000	500	15

5.1.3 Strukturen und Strukturanalyse

Die untersuchten Hohlkugelstrukturen wurden umfassend in ihren Strukturparametern charakterisiert. Dazu gehören die Gesamtporosität, der Porendurchmesser, die sekundäre Porosität, die Dicke der Stege und die Stegfläche. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Tabelle 5.3 dargestellt.

Tab. 5.3: Strukturparameter der untersuchten Hohlkugelstrukturen

Material	E (%)	E_{sek} (%)	d_{por} (mm)	d_{steg} (μ m)	Stegfläche (%)	Hersteller
Fe	81	9,4 - 17,6	1,6	117,6 - 194,3	38	IFAM
	93	0,9 - 3,9	2,5	31,3 - 50,1	12	
Stahl 1.4841	93	0,8 - 4,5	3,8	74,1 - 122,2	12	
	95	4,5 - 10,6	4,6	61,1 - 93,5	11	
Stahl 1.4767	90	2,3 - 5,8	3,7	52,3 - 124,4	15	
Stahl 1.4404	94	9,4 - 11,5	1,5	27,1 - 64,8	14	
Stahl 1.4401	95	3,1 - 6,2	2,5	30,6 - 54,8	8	HO
Fe	89	-	3,1	120 - 160	17	
	90	7,7 - 14,9	2,9	100 - 160	12	
	90	-	5,9	190 - 230	14	

Die Porosität wurde nach Gleichung 2.3 ermittelt. Die Zelldichte ρ_{zell} wurde dabei aus dem Verhältnis m_{zell}/V_{zell} bestimmt. Die Masse m_{zell} wurde durch Wiegen der Proben ermittelt und das Volumen V_{zell} aus den geometrischen Abmessungen. Der Porendurchmesser wurde mit dem berührungslosen 2-Achsen(XY)-Messsystem der Firma Vision Engineering (Messmikroskop) am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik der TU Bergakademie Freiberg (IWTT, Lehrstuhl für Gas- und Wärmetechnische Anlagen) sowie durch Lichtmikroskopie mit dem Gerät Neophot 30 (Umgekehrtes Auflichtmikroskop) am Institut für Werkstoffwissenschaft der TU Bergakademie Freiberg (IWW) gemessen. Für die Lichtmikroskopie wurden die untersuchten Materialien speziell präpariert. Dazu wurden Proben mit der maximalen Abmessung 20 mm x 20 mm x 15 mm ausgeschnitten und mit einem Kalteinbettmittel (Eprofix) in einem Zylinder der Größe $\varnothing 30$ mm x 20 mm eingebettet. Ein Beispiel einer Analyse mit dem Messmikroskop für eine Hohlkugelstruktur aus Eisen (IFAM) mit der Porosität 93 % ist in der Abbildung 5.2 dargestellt.

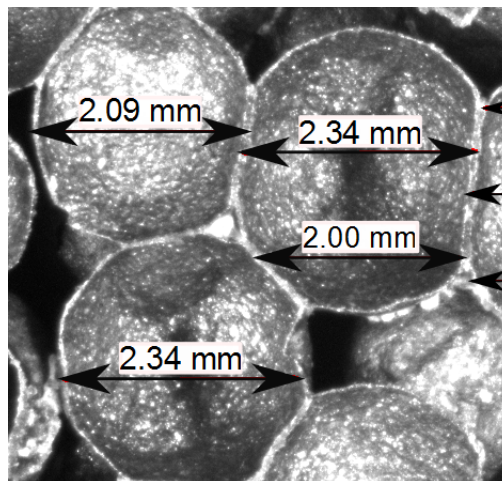


Abb. 5.2: Bildaufnahme vom Messmikroskop für die Bestimmung der Porendurchmesser bei einer Hohlkugelstruktur (IWTT, TU BAF)

In der Tabelle 5.3 ist der Mittelwert der Porendurchmesser (d_{por}) angegeben. Die Analysen der anderen untersuchten Materialien sind im Anhang A.2.1 dargestellt.

Die sekundäre Porosität und die Dicke der Stege wurden mit Ausnahme der Strukturen aus Eisen (HO) mit dem Lichtmikroskopie-Gerät Neophot 30 gemessen. Für die Bestimmung der sekundären Porosität wurde das Objektiv 50 x 10 verwendet und für die Stegdicke das Objektiv 6,3 x 10. Für die Auswertung wurde das A-fi Analysis-Programm eingesetzt. Bei der Bestimmung der sekundären Porosität wurde die Operation „Binärisierung von Bereichen“ verwendet. Dabei wurden die Mikroporen mit roter Farbe markiert und prozentual die sekundäre Porosität (E_{sek}) angegeben. Ein Beispiel einer solchen Auswertung ist in der Abbildung 5.3 für die Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 (IFAM) mit der Porosität 93 % gezeigt.

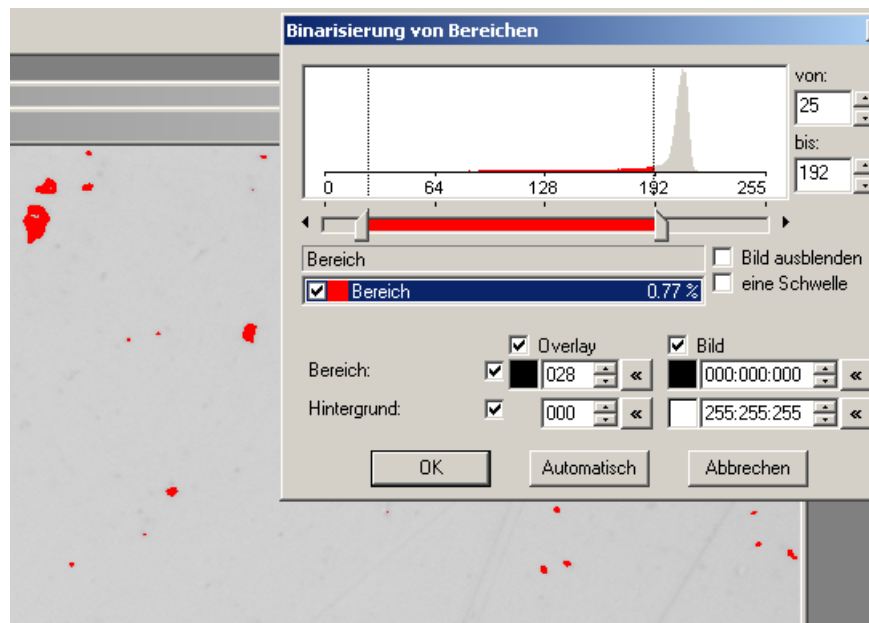


Abb. 5.3: Auswertung für die Bestimmung der sekundären Porosität bei Hohlkugelstrukturen (IWW, TU BAF)

Bei der Bestimmung der sekundären Porosität wurden von jeder Probe 5 Mikroskop-aufnahmen gemacht, in der Tabelle 5.3 sind die Bereiche angegeben. Dabei ist zu sehen, dass die sekundäre Porosität stark variiert, in Abhängigkeit davon, welcher Steg für die Analyse ausgewählt wurde. Dies bestätigt, dass es durch die Herstellung Unterschiede in der inneren Struktur gibt. Die Werte der sekundären Porosität der weiteren untersuchten Materialien werden im Anhang A.2.2 präsentiert. Die Angaben für die sekundäre Porosität fehlen bei der Struktur aus Eisen mit $d_{por} = 5,9$ mm, da der Porendurchmesser für die notwendige Proben $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ für die Lichtmikroskopie zu groß ist. Die Analyse der sekundären Porosität konnte bei der Struktur aus Eisen mit $d_{por} = 3$ mm nicht durchgeführt, weil die unzerstörten Proben für eine Vergleichsmessung in einem anderen Laboratorium benötigt wurden.

Für die Bestimmung der Stegdicke (d_{steg}) mit der Lichtmikroskopie wurde die Option „Linearanalyse“ ausgewählt. Ein Beispiel einer solchen Analyse der Eisen-Struktur (IFAM) mit der Porosität 93 % ist in der Abbildung 5.4 zu sehen.

Bei einer Struktur aus Eisen ($d_{por} = 3,1$ mm, HO) wurde nicht das Lichtmikroskop, sondern das Messmikroskop für die Bestimmung der Stegdicke eingesetzt, weil nur eine begrenzte Anzahl von Proben zur Verfügung stand. Bei der Analyse im Lichtmikroskop wäre ein Zerteilen und damit Zerstören einer Probe notwendig gewesen. Diese spezielle Analyse ist in der Abbildung 5.5 dargestellt.

Die Analyse der Stegdicke der weiteren untersuchten Materialien ist im Anhang A.2.3

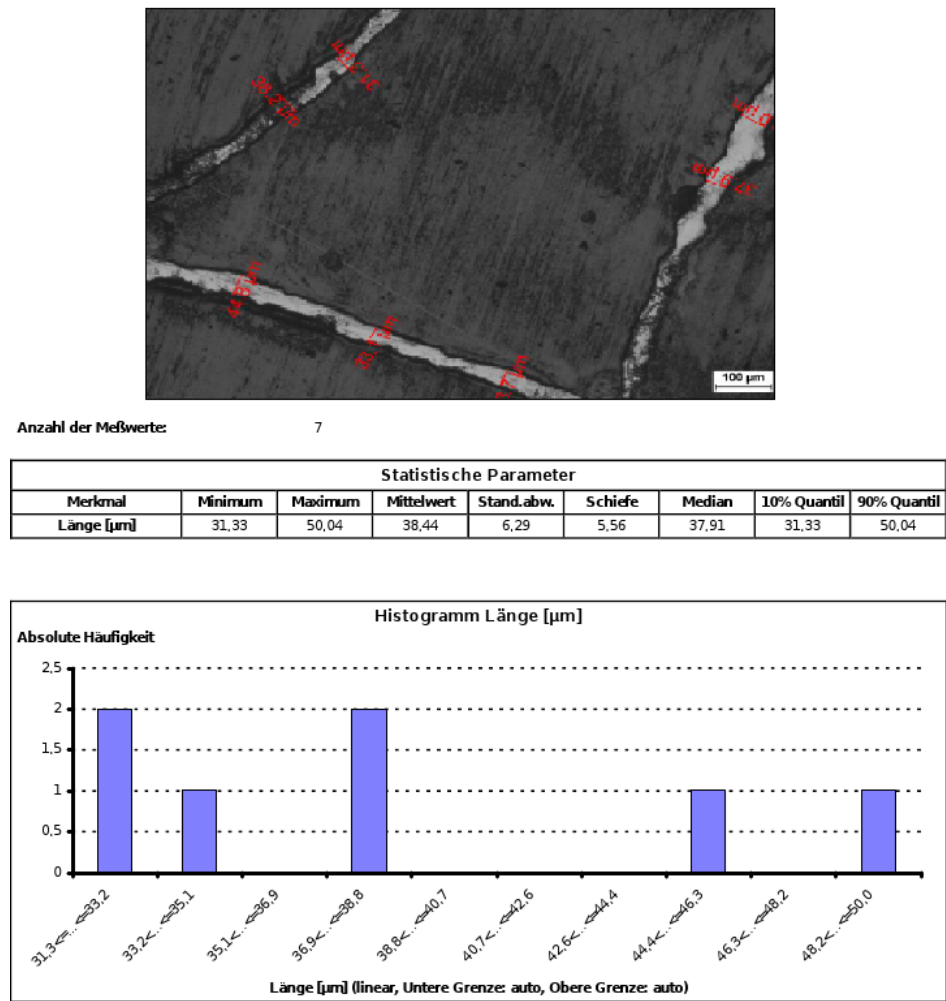


Abb. 5.4: Auswertung für die Bestimmung der Stegdicke bei Hohlkugelstrukturen mit der Lichtmikroskopie (IWTT, TU BAF)

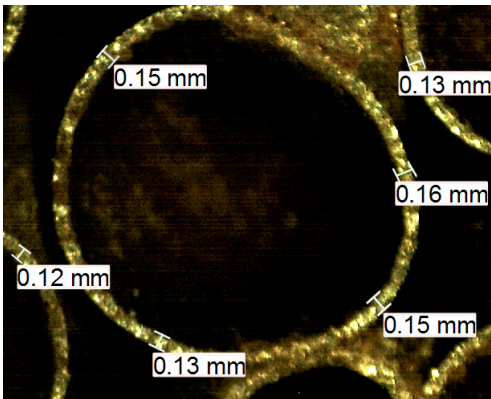


Abb. 5.5: Bestimmung der Stegdicke bei Hohlkugelstrukturen mit dem Messmikroskop (IWTT, TU BAF)

präsentiert. Unter dem Parameter „Stegfläche“ ist die Schnittfläche aller Stege auf der Oberfläche der untersuchten Materialien nach der Probenpräparation zu verstehen. Sie ist von besonderer Bedeutung, da sie die Kontaktfläche für viele Messverfahren darstellt.

Diese Größe wurde am Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme Dresden (IKTS) bestimmt. Die Messgenauigkeit einer solchen Analyse beträgt circa 5 %. Dafür wurde ein spezielles System mit der Bezeichnung „PORESCAN“ verwendet, das für die Strukturanalyse von porösen Werkstoffen geeignet ist. Das System besteht aus Mikroskop, Beleuchtung, Kamera und Rechner. Ein Beispiel einer solchen Analyse der Eisen-Struktur (IFAM) mit der Porosität 93 % ist in der Abbildung 5.6 dargestellt.

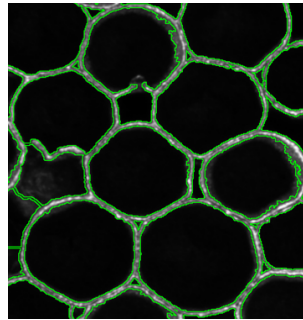


Abb. 5.6: Bestimmung der Stegfläche bei Hohlkugelstrukturen mit dem System „PORESCAN“ (IKTS)

Die Analyse der anderen untersuchten Hohlkugelstrukturen ist im Anhang A.2.4 enthalten. Für die visuelle Darstellung der Hohlkugelstrukturen wurde die Computer-Tomographie (CT) „CT-ALPHA“ (Hersteller: ProCon X-Ray GmbH Garbsen) am Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik der TU Bergakademie Freiberg (IKGB) angewendet. Dieses Gerät erfordert jedoch für die Untersuchung von Metallen sehr kleine Abmessungen der Proben 10 mm x 10 mm x 10 mm. Ursache dafür ist, dass die freien Elektronen bei den Metallen Störungen bei den Bildaufnahmen verursachen, die bei größeren Proben die Messungen unmöglich machen. Die geringen Abmessungen der Proben lassen es bei den untersuchten Materialien jedoch nicht zu, die gesamte Struktur darzustellen. Darum wurden die CT-Aufnahmen nur für die visuelle Darstellung eingesetzt. Als Test wurde nur eine einzige Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4767 mit der Porosität 93 % mit dem CT untersucht, die in der Abbildung 5.7 dargestellt wird.

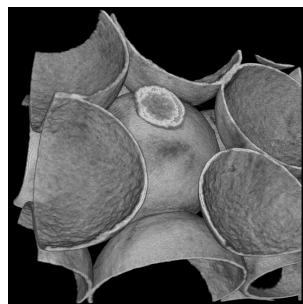


Abb. 5.7: Computer-Tomographie-Aufnahme der Hohlkugelstruktur (IKGB, TU BAF)

5.2 Aufgeschäumte Strukturen

Die untersuchten aufgeschäumten Strukturen aus AlSiMg0,5 wurden am Metallschaumzentrum Chemnitz Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) hergestellt. Beide untersuchte Strukturen sind in der Abbildung 5.8 dargestellt.

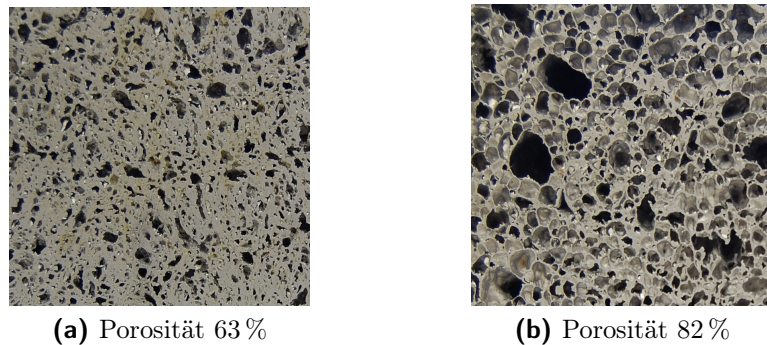


Abb. 5.8: Geschlossenzellige aufgeschäumte AlSiMg0,5-Strukturen

Sie gehören zu geschlossenzelligen Strukturen, deren Strukturparameter in der folgenden Tabelle dargestellt sind:

Tab. 5.4: Untersuchte aufgeschäumte Strukturen

Material	λ_F (W/(m K))	E (%)	d_{por}^* (mm)	Hersteller
AlMgSi0,5	210	63	0,9 - 4,3	IWU
		82	1,2 - 8,2	

* Untersuchungen mit Messmikroskop

Die beiden Materialien unterscheiden sich demnach bei gleichem Grundmaterial in der Porosität und Porengröße. Jede Struktur für sich hat fertigungsbedingt sehr verschiedene Porengrößen und eine unregelmäßige Porengrößenverteilung. Um für diese Bedingungen überhaupt Messwerte gewinnen zu können, werden Proben mit maximaler Abmessung in Form von Würfeln 120 mm x 120 mm x 120 mm verwendet.

5.2.1 Herstellung

Die untersuchten Materialien wurden durch einen speziellen Aufschäumprozess hergestellt, der von *Neugebauer u. a. [52]* beschrieben wird. Das Schema der Herstellungsmethode ist in der Abbildung 5.9 dargestellt.

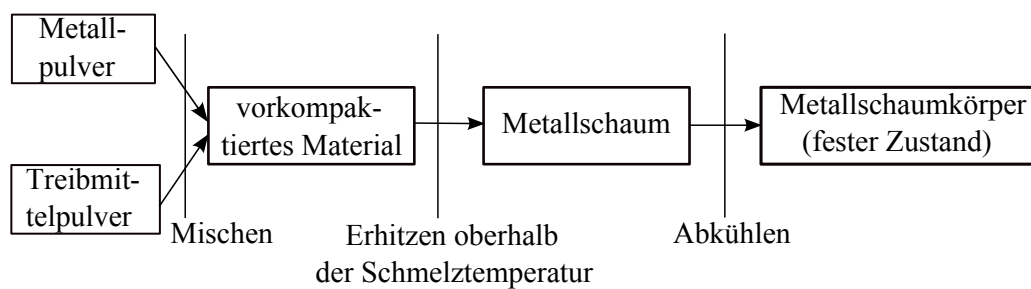


Abb. 5.9: Herstellung der geschlossenzelligen aufgeschäumten Strukturen (Neugebauer u. a. [52])

Metallpulver und Treibmittel werden gemischt und verdichtet. Die Verdichtung wird z. B. durch Pulverstrangpressen oder axiales Heißpressen realisiert. Als Treibmittel wird TiH_2 oder ZrH_2 verwendet. Die Halbzeuge aus Metallpulver und Treibmittel werden bis über die Schmelztemperatur erwärmt und dabei unter Gasfreisetzung des Treibmittels aufgeschäumt. Die entstandene Struktur bleibt bei der Abkühlung erhalten und es entsteht der feste Metallschaum.

5.2.2 Charakterisierung des Grundmaterials

Die aufgeschäumten zellularen Strukturen wurden aus einer Standard-Aluminiumlegierung hergestellt. Genauso wie bei den Hohlkugelstrukturen wurden die Eigenschaften des Grundmaterials aus dem Datenblatt, (Anhang A.1) entnommen und die wichtigsten Eigenschaften sind in der Tabelle 5.5 dargestellt.

Tab. 5.5: Thermophysikalische Eigenschaften des Grundmaterials

Material	ρ (kg/m ³)	c_p (J/(kg K))	λ_F (W/(m K))
AlMgSi0,5	2700	960	210

5.2.3 Strukturen und Strukturanalyse

Die aufgeschäumten Materialien wurden im Vergleich zu den Hohlkugelstrukturen nur begrenzt strukturell charakterisiert auf Grund der Tatsache, dass die Strukturen unregelmäßig sind und es nicht möglich ist, die Einflüsse der strukturellen Parameter auf die effektive Wärmeleitfähigkeit gezielt zu untersuchen. Die Ergebnisse für Porosität und Porendurchmesser sind bereits in der Tabelle 5.4 dargestellt. Die Porosität wurde genauso bestimmt wie bei den Hohlkugelstrukturen, nämlich durch die Massebestimmung und die geometrische Volumenbestimmung. Die Breite und die Länge der Poren wurden mit

dem berührungslosen 2-Achsen(XY)-Messsystem der Firma Vision Engineering (Messmikroskop) am Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik (Lehrstuhl für Gas- und Wärmetechnische Anlagen) gemessen. Ein Beispiel solcher Untersuchungen ist in der Abbildung 5.10 dargestellt.

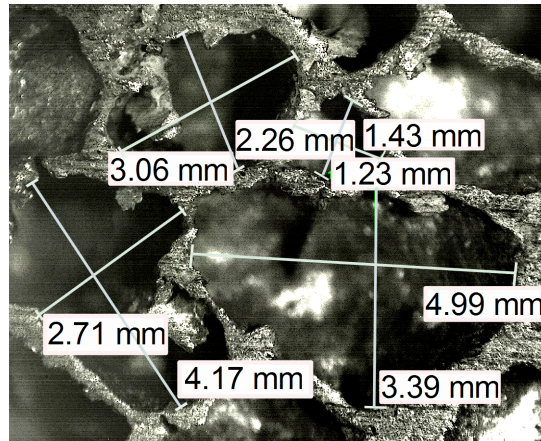


Abb. 5.10: Bildaufnahme vom Messmikroskop für die Bestimmung der Porendurchmesser bei aufgeschäumten Strukturen (IWTT, TU BAF)

Die Analyse der zweiten Struktur ist im Anhang A.2.1 präsentiert.

5.3 Offenzellige Strukturen

Für die vorliegende Forschungsarbeit wurden von der Firma Hollomet GmbH (HO) und der Firma m.pore GmbH (MP), Dresden, gezielt offenzellige Strukturen hergestellt. Außerdem wurden zusätzlich offenzellige Strukturen aus AlMgSi0,5 von der Firma Composite Materials (CM) in Ekaterinburg hergestellt. Die Firma Hollomet GmbH versuchte bei der Herstellung, die Porosität bei ca. 90 % zu fixieren und dabei die Porengröße im Bereich von 0,9 mm bis 7,2 mm zu variieren. Als Grundmaterial wurde FeCrAl-Metallpulver verwendet. Von der Firma m.pore GmbH wurden Strukturen aus einer Aluminiumlegierung (AlSi7Mg0,3) mit drei verschiedenen Porengrößen und der Porosität von ca. 90 % hergestellt. Die Tabelle 5.6 präsentiert die untersuchten offenzelligen Strukturen.

5.3.1 Herstellung

Die offenzelligen metallischen Strukturen der Firma Hollomet GmbH wurden ebenso wie die Hohlkugelstrukturen pulvermetallurgisch hergestellt. Der Herstellungsprozess ist in der Abbildung 5.11 dargestellt.

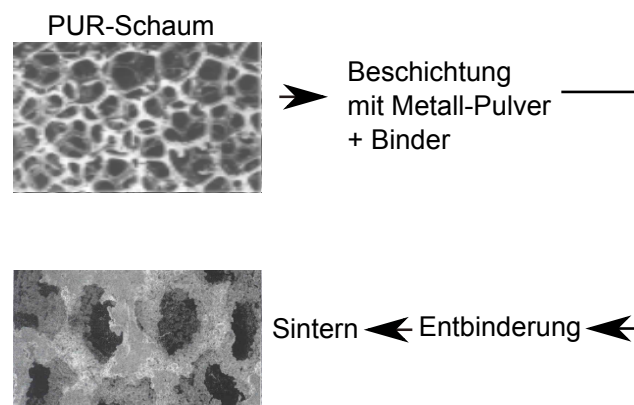
Tab. 5.6: Untersuchte offenzellige Strukturen

Material	λ_F (W/(m K))	E (%)	d_{por}^{**} (mm)	Hersteller
FeCrAl	11,2*	88-91	0,9	HO
		84-86	1,3	
		87-89	1,9	
		89-90	2,8	
		88-89	3,6	
		89-91	4,5	
		88-90	7,2	
AlSi7Mg0,3	170	93	0,8	MP
			1,3	
		86	2,5	
AK7II4***	155	53	-	CM

* eigene Messungen

** Porendurchmesser des PU-Schaumes

*** keine europäische Bezeichnung

**Abb. 5.11:** Herstellung von offenzelligen Strukturen (*Quadbeck [57], Queheillalt u. a. [60]*)

Die ausführliche Beschreibung des Herstellungsprozesses ist in den Arbeiten von *Schatt u. a. [64]*, *Quadbeck [57]* und *Baumeister [9]* zu finden. Im Vergleich zu den Hohlkugelstrukturen werden Polyurethanschäume als Trägermaterialien verwendet. Die Methode wurde für die Herstellung von porösen Keramiken entwickelt und im Jahr 1961 patentiert (*Schwartzwalder u. a. [67]*). Die Beschichtung dieser PU-Schäume mit der Metallpulver-Binder-Suspension geschieht durch Walzen. Im Temperaturbereich 200 – 600 °C werden Binder und PU-Schaum verdampft und danach die gebildete Struktur gesintert. Die Sinterungstemperaturen betragen 1100 – 1300 °C. Als Sinteratmosphären werden Vakuum, H₂ oder Ar verwendet, um Oxidationsprozesse zu vermeiden.

Die offenzelligen Strukturen aus der Aluminium-Legierung (MP) wurden durch ein patentiertes Feingussverfahren (*Girlich [28]*) hergestellt. *Hackeschmidt und Girlich [34]* beschreiben die Herstellungsmethode. Ebenso wie bei den offenzelligen pulvermetallurgisch hergestellten Strukturen werden Polyurethanschäume als Trägermaterial eingesetzt. Sie werden mit Wachs stabilisiert und mit einer feuerfesten Masse umgossen. Das so präparierte Modell wird anschließend getrocknet und gebrannt, dabei pyrolysiert der PU-Schaum. Danach wird die Struktur mit flüssigem Metall ausgegossen. Am Ende muss der Formstoff durch Auswaschen wieder entfernt werden.

Für die offenzelligen Strukturen aus AlMgSi0,5 (CM) wurden als Trägermaterial Chlorid-Feststoffteilchen (Salz) eingesetzt. Die Herstellungsmethode ist bei *Cherny u. a. [18]* dargestellt. Das Ausgangsmaterial ist eine flüssige Aluminium-Legierung, die mit dem Trägermaterial zusammengemischt wird. Danach werden die wasserlöslichen Chlorid-Feststoffteilchen entfernt und an diesen Stellen bilden sich die offenen Poren.

5.3.2 Charakterisierung des Grundmaterials

Im Gegensatz zur Vorgehensweise bei den Hohlkugelstrukturen wurde das Grundmaterial der offenzelligen Strukturen (HO) auf Grund der unbekannten Legierung speziell thermophysikalisch untersucht. Am IWTT wurden folgende Eigenschaften bestimmt: die spezifische Wärmekapazität c_p , der thermische Ausdehnungskoeffizient α , die Temperaturleitfähigkeit a und die Dichte ρ . Zur Gewinnung der Probekörper wurde Metallpulver in der erforderlichen Menge zu einem Rohling gesintert und die Proben daraus durch mechanische Bearbeitung gefertigt. Die Temperaturleitfähigkeit wurde mit der Laser-Flash-Apparatur LFA 427 (Fa. Netzsch) bestimmt. Der Messprinzip dieses Verfahrens ist im Kapitel 6.2.2 dargestellt. Die spezifische Wärmekapazität wurde mit dem Multi-HTC 96 (Fa. Setaram) bestimmt. Ein Dilatometer DIL 402 C (Fa. Netzsch) wurde für die Bestimmung des Ausdehnungskoeffizienten verwendet. Die Dichte wurde bei Raumtemperatur mit einer Archimedes-Waage ermittelt. Mit Hilfe des Ausdehnungskoeffizienten konnten temperaturabhängige Dichtewerte berechnet werden.

Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit wurde anschließend mit folgender Gleichung bestimmt:

$$\lambda(T) = a(T) \rho(T) c_p(T) \quad (5.1)$$

Die gewonnenen Messergebnisse sind in der Abbildung 5.12 präsentiert.

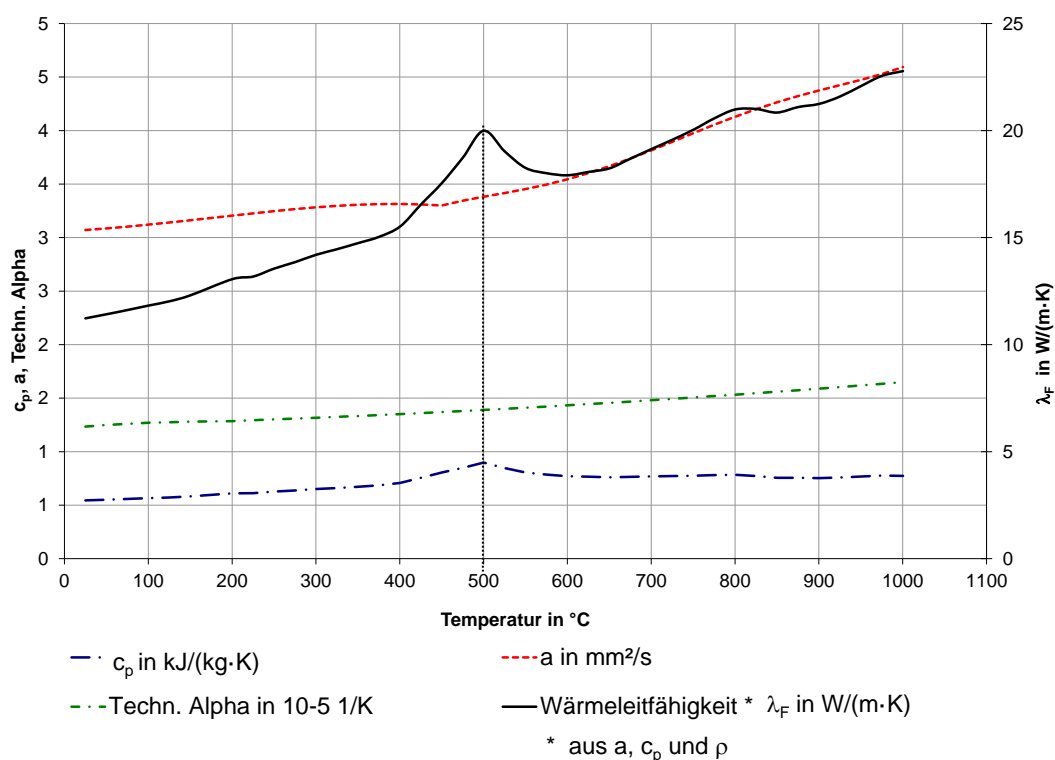


Abb. 5.12: Eigenschaften des Grundmaterials FeCrAl

Die weiteren offenzelligen Strukturen (MP, CM) wurden aus Standardlegierungen hergestellt. Die wichtigsten Eigenschaften, die mit Hilfe der Datenblätter (Anhang A.1) ergänzt wurden, sind in der Tabelle 5.7 dargestellt.

Tab. 5.7: Thermophysikalische Eigenschaften des Grundmaterials

Material	ρ (kg/m ³)	c_p (J/(kg K))	λ_F (W/(m K))
FeCrAl	6700	544	11
AlSi7Mg0,3	2680	920	170
AlMgSi0,5	2660	880	155

5.3.3 Strukturen und Strukturanalyse

Auch für die offenzelligen Strukturen wurden die wichtigsten Strukturparameter bestimmt. Dazu gehören die Porosität, die sekundäre Porosität, die Dicke der Stege und die Stegfläche. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5.8 dargestellt.

Tab. 5.8: Strukturparameter der untersuchten offenzelligen Strukturen

Material	E (%) von... bis...	E_{sek} (%) von... bis...	d_{por}^* (mm)	d_{steg} (μm)	Stegfläche (%)	Hersteller
FeCrAl	89	0,8 - 2,6	0,9	-	-	HO
	85	1,2 - 10,8	1,3	-	-	
	87 - 89	2,8 - 9,4	1,9	253	16	
	89 - 90	3,9 - 4,6	2,8	-	-	
	88	1,7 - 2,9	3,6	426	16	
	89 - 91	4,6 - 6,9	4,5	-	-	
	88 - 90	5,2 - 13,3	7,2	497	12	
AlSi7Mg0,3	93	-	0,8	-	-	MP
	93	-	1,3	-	-	
	86	-	2,5	820	10	
AlMgSi0,5	53	-	-	-	61	CM

* Porendurchmesser des PU-Schaumes

Dabei wurde nicht nur eine Probe mit der entsprechenden Porengröße untersucht, sondern es wurden immer mehrere Proben verwendet und die Ergebnisse gemittelt. Die Porosität wurde ebenso wie bei den Hohlkugelstrukturen, durch Wiegen und eine geometrische Volumenbestimmung nach der Gleichung 2.3 ermittelt. In der Tabelle sind die Bereiche der Porosität angegeben.

Die Bestimmung des Porendurchmessers bei den offenzelligen Strukturen ist im Vergleich mit den Hohlkugelstrukturen schwierig, da die Poren keine Kugelform, sondern die Form eines Dodekaeders haben. Beim Messmikroskop oder auch bei der Lichtmikroskopie ist es kompliziert festzustellen, wo ein Dodekaeder beginnt und endet. In der Tabelle 5.8 sind deshalb bei den Strukturen die Porendurchmesser des PU Schaumes, die für die Herstellung der entsprechenden Materialien eingesetzt wurden, angegeben (Information von Hersteller HO, MP). Bei der offenzelligen Struktur aus AlMgSi0,5 gibt es keine Information über die Porendurchmesser und die Porengröße kann nicht bestimmt werden, weil die Poren keine Kugelform haben.

Die sekundäre Porosität (E_{sek}) der Stege wurde ebenso wie bei den Hohlkugelstrukturen bestimmt. Ein Beispiel der sekundären Porositätsbestimmung der offenzelligen Struktur aus FeCrAl mit $d_{por} = 1,9$ mm ist in der Abbildung 5.13 präsentiert.

Für weitere Materialien ist diese Untersuchung im Anhang A.2.2 zu finden. In der Tabelle 5.8 sind wieder Bereiche der sekundären Porosität für die Strukturen aus FeCrAl

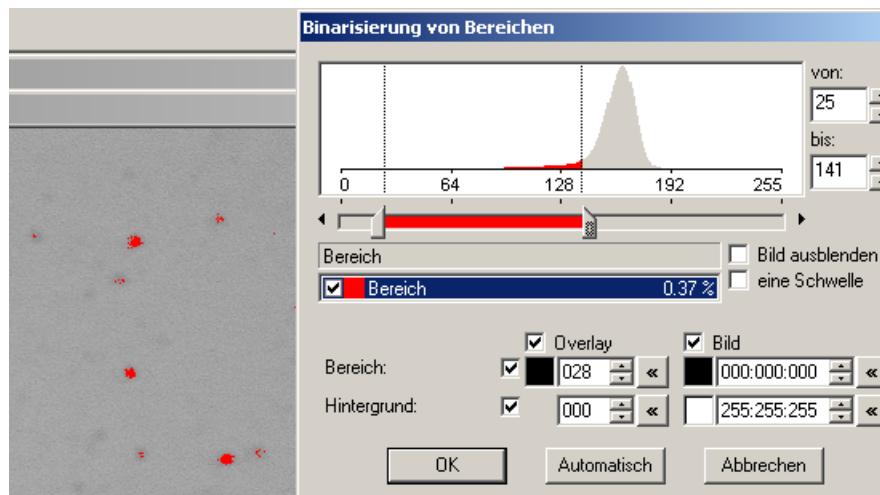


Abb. 5.13: Auswertung für die Bestimmung der sekundären Porosität bei offenzelligen Strukturen (FeCrAl; $d_{por} = 1,9\text{ mm}$; IWW TU BAF)

angegeben, da die Werte von Steg zu Steg variieren. Bei den Strukturen aus Aluminium-Legierungen konnte die sekundäre Porosität aufgrund der begrenzten Probenmenge nicht bestimmt werden.

Für die Bestimmung der Stegdicke wurde versucht, die Lichtmikroskopie einzusetzen. Dabei hat sich jedoch gezeigt, dass sich die Stegdicke auf Grund der Probenpräparation für die Lichtmikroskopie (Schleifen) verändert hat. Aus diesem Grund wurden die bereits gemessenen offenzelligen Strukturen (mit erodierten Oberflächen) am IKTS untersucht und dabei die Stegdicken und die Stegflächen bestimmt. Auf Grund des Aufwandes für diese Untersuchungen wurde dies nur an ausgewählten Proben durchgeführt.

Bei der Stegdickenbestimmung wurde berücksichtigt, dass die Stege, die in der Länge geschnitten wurden (rot markiert), nicht gemessen wurden. Die Abbildung 5.14 zeigt die Besonderheiten dieser Auswertungsmethode.



Abb. 5.14: Besonderheiten der Stegdickenbestimmung (IKTS)

Ein Beispiel der Auswertungsdatei der gemessenen Stegdicken ist in der Abbildung 5.15 für die offenzellige Struktur aus FeCrAl mit $d_{por} = 1,9\text{ mm}$ dargestellt.

Parameter	Mittelwert
Stegdicke	253 μm
Anzahl ausgewerteter Poren:	181

Abb. 5.15: Auswertungsdatei der Stegdickenbestimmung (IKTS)

Die Ergebnisse der weiteren Strukturen sind im Anhang A.2.3 dargestellt. Weil diese Materialien einen anderen Aufbau haben, wurde die Stegdicke für die AlMgSi0,5-Strukturen nicht bestimmt. Dies ist in der Abbildung 5.16 zu sehen.

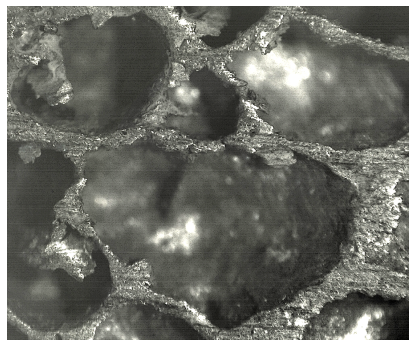


Abb. 5.16: Fotoaufnahme der offenzelligen AlMgSi0,5-Struktur

Der Parameter „Stegfläche“ wurde für die offenzelligen Strukturen ebenso wie bei den Hohlkugelstrukturen bestimmt (siehe Kapitel 5.1). Ein Beispiel einer solchen Analyse für die FeCrAl Struktur (HO) mit $d_{por} = 1,9 \text{ mm}$ ist in der Abbildung 5.17 dargestellt.

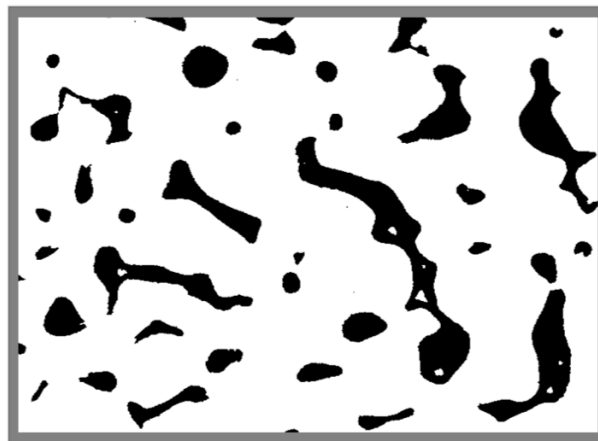


Abb. 5.17: Bestimmung der Stegfläche bei einer offenzelligen Struktur mit dem System „PORESCAN“(IKTS)

Die Analyse der Stegfläche der anderen untersuchten offenzelligen Strukturen ist im Anhang A.2.4 dargestellt.

6 Eingesetzte Messapparaturen und Probenpräparation

Die Wärmeleitfähigkeit kann mit verschiedenen Messmethoden gemessen werden, die bereits im Kapitel 4.2 präsentiert sind. Dieses Kapitel stellt die verwendeten Messverfahren und die notwendigen Probenpräparationen für die optimale Durchführung der Messungen der Wärmeleitfähigkeit von porösen metallischen Strukturen dar. Bei der Auswahl der Messmethoden wurden die erwarteten Wärmeleitfähigkeitsbereiche, die Eigenschaften der Grundmaterialien, die Struktureigenschaften, die Porositäten, die Porengrößen, die Möglichkeiten der Probenpräparation, die Geometrien, die Messgenauigkeiten und vorherige Erfahrungen der anderen Wissenschaftler berücksichtigt. In der vorliegenden Arbeit wurden das Plattenverfahren als stationäre Methode sowie die TPS-Methode und Laser-Flash-Apparatur (indirektes Verfahren) als instationäre eingesetzt.

6.1 Stationäre Messmethode - Plattenverfahren

Die eingesetzte Plattenmessapparatur PMA2 wurde für die Messungen bei höheren Temperaturen am Lehrstuhl für Technische Thermodynamik der TU BAF entwickelt. Sie arbeitet nach dem stationären Panel-Test-Prinzip und wurde in der Arbeit von *Wulf* [86] für die Untersuchung von Dämmstoffen angewendet. Eine ausführliche Beschreibung der Konstruktion und Arbeitsweise ist in den Arbeiten von *Gross u. a.* [30] und *Wulf u. a.* [87] zu finden. Die schematische Darstellung der PMA2 (Abbildung 6.1) wurde aus der Arbeit von *Wulf* [86] übernommen.

Die Probe wird von oben aus einem Ofenraum beheizt, in dem sich 18 waagerecht angeordnete SiC-Heizstäbe befinden. Die Zustellung des Heizteils besteht im unteren Bereich aus feuerfesten Steinen und im oberen aus keramischen Faserplatten. Die maximal erreichbare Ofenraumtemperatur beträgt 1450°C. Der Wärmestrom \dot{Q} wird in einem wasserdurchströmten Kalorimeter unterhalb der Probe gemessen. Die Wärmeleitfähigkeit wird dabei für die stationäre, eindimensionale Wärmeleitung durch folgende Gleichung bestimmt:

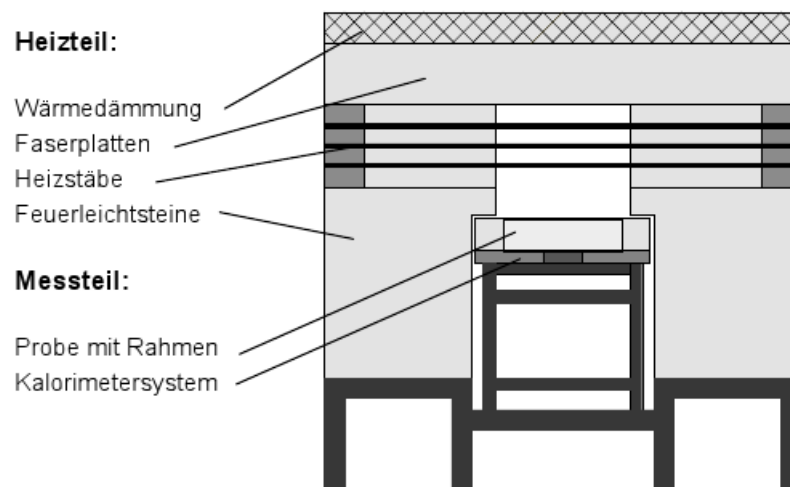


Abb. 6.1: Schematische Darstellung der Plattenmessapparatur PMA2 (Wulf [86])

$$\lambda = \frac{\dot{Q} s}{A (T_1 - T_2)} \quad (6.1)$$

Darin sind s die Probendicke und A die Messfläche senkrecht zum Wärmestrom. Die gesamte Probenfläche beträgt 300 mm x 300 mm. Die Abmessung des zentralen Messkalorimeters ist 100 mm x 100 mm. Die Proben können Gesamtdicken bis zu 120 mm haben. Zur Messung der Probentemperaturen T_1 und T_2 werden je nach Temperaturbereich verschiedene Thermoelemente eingesetzt. Die untersuchten zellularen Strukturen wurden bis zu einer maximalen Ofenraumtemperatur von 1000 °C gemessen. Die Proben wurden so aufgebaut, wie es in der Abbildung 6.2 dargestellt ist.

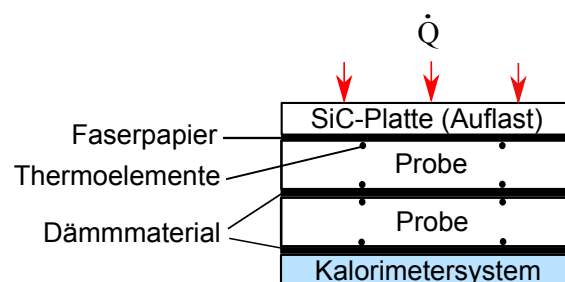


Abb. 6.2: Probenaufbau PMA2 zur Messung der zellularen Strukturen

Zwischen die beiden untersuchten Proben sowie darüber und darunter wurde ein Dämmstoff (im Allgemeinen Faserpapier mit der Dicke 2 mm) gelegt. Diese Maßnahmen wurden speziell durchgeführt, um definierte Kontaktwiderstände zu schaffen. Außerdem waren die Proben nicht ganz planparallel. Als obere Auflage wurde eine SiC-Platte verwendet, die auf Grund ihrer Masse eine gute Kontaktierung aller Schichten des Probenstapels gewähr-

leisten soll. Für die Bestimmung der Temperaturen wurden Thermoelemente vom Typ K eingesetzt. Sie wurden in zuvor in die Probenoberfläche eingebrachte Nuten eingelegt und mit einem Hochtemperaturkleber an der Probe befestigt. Die Messspitzen der Thermoelemente wurden dabei frei von Kleber gelassen. Die Abbildung 6.3 zeigt einen solchen Aufbau.



Abb. 6.3: Fixierte Thermoelemente auf der Oberfläche der offenzelligen Struktur (PMA2)

Auf jeder Probenschicht wurden 5 kalibrierte Thermoelemente angeordnet und der Mittelwert der einzelnen Anzeigewerte gebildet. Die Abbildung 6.4 präsentiert die Anordnung der Thermoelemente auf der Probenoberfläche.

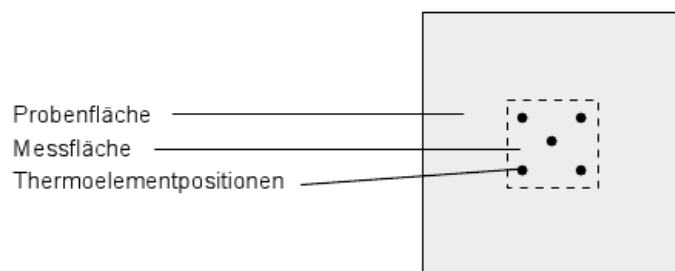


Abb. 6.4: Anordnung der Thermoelemente auf der Probenoberfläche (PMA2)

Nicht alle untersuchten Proben haben die gesamte Probenfläche von 300 mm x 300 mm, einige hatten nur geringere Abmessungen. In jedem Fall waren aber die Proben größer als die Messfläche von 100 mm x 100 mm des Kalorimeters. Das restliche Volumen des Probenraumes wurde in solchen Fällen unter Umständen mit einem Dämmstoff (im Allgemeinen einer Fasermatte) ausgefüllt.

6.2 Instationäre Messmethoden

6.2.1 TPS-Messverfahren

Alle untersuchten Materialien wurden mit dem TPS-Verfahren untersucht. Darum wird diese Messmethode in der vorliegenden Arbeit besonders ausführlich dargestellt.

Das TPS-Verfahren ist eine instationäre Technik für die Messung von Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität. Der Messprinzip basiert auf der Transient-Plane-Source-Theorie (TPS), die Silas E. Gustafsson für Flüssigkeiten im Jahr 1967 und für Feststoffe im Jahr 1979 entwickelte. Die Messmethode wurde in Schweden im Jahr 1988 (*Gustafsson [31]*) und in den USA im Jahr 1991 (*Gustafsson [32]*) patentiert. Die Messmethode wird im Internationalen Standard ISO 22007-2 ausführlich beschrieben und arbeitet in ähnlicher Weise wie die klassische Hot-Wire-Methode. Als Wärmequelle wird jedoch ein flächiger, kreisförmiger Sensor verwendet, der zwischen zwei identischen Probekörperhälften eingesetzt wird. Er dient als Wärmequelle und Widerstandsthermometer zugleich und besteht aus einer doppelten Nickel-Spirale, die in Form von Kreisen gewickelt und zwischen zwei Isolationsschichten eingebettet ist. Der Sensor wird mit konstanter Leistung beheizt, der Wärmestrom fließt in die beiden Probenhälften und es bildet sich ein instationäres ellipsoides Temperaturfeld aus, wie in der Abbildung 6.5 dargestellt ist.

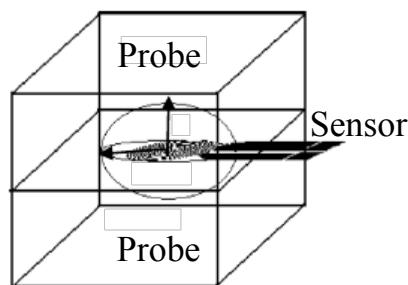


Abb. 6.5: Wärmeausbreitung vom Sensor in die Proben (TPS, *Solorzano u. a. [70]*)

Dabei wird die Temperaturänderung des Sensors während der Beheizungszeit gemessen. Bei gut leitenden Materialien wird der eingebrachte Wärmestrom schnell durch das Material abtransportiert. Bei gleicher Leistung und Messzeit erwärmt sich der Sensor demzufolge weniger als bei einem schlechter leitenden Material. Die Temperatur-Zeit-Funktion des Sensors ist daher charakteristisch für die thermischen Eigenschaften des Materials.

Die mittlere Temperaturerhöhung des Sensors wird als Funktion einer dimensionslosen Zeit $\Delta \bar{T}(\tau)$ mit Hilfe der Messung seines elektrischen Widerstandes R_{el} ermittelt. Es

gilt:

$$R_{el} = R_0 [1 + \alpha \Delta \bar{T}(\tau)]. \quad (6.2)$$

Dabei ist R_0 der Widerstand zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ s, α ist der bekannte Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes der Ni-Spirale. τ ist die dimensionslose Zeit nach:

$$\tau = \sqrt{t/\theta} = \frac{\sqrt{ta}}{R}. \quad (6.3)$$

t ist dabei die Messdauer, R der Radius des Sensors und a die Temperaturleitfähigkeit der Probe. Das Modell, das für die Auswertung beim TPS Verfahren eingesetzt wird, ist z. B. bei He [37], Gustafsson [33], Suleiman u. a. [76], He [36] und Bohac u. a. [14] dargestellt. Besonders ausführlich schildert He [37] die mathematische Herleitung von der Fourier-schen Differentialgleichung zur exakten analytischen Lösung des Temperaturfeldes. Nach einer Mittelwertbildung über alle Ringe des Sensors erhält er die mittlere Temperaturerhöhung:

$$\Delta \bar{T}(\tau) = \frac{P_0}{\sqrt{\pi^3} R \lambda} D(\tau). \quad (6.4)$$

Dabei ist P_0 die angegebene Heizleistung während der Messung, λ die Wärmeleitfähigkeit der Probe, R ist der Sensorradius und $D(\tau)$ ist eine Funktion der dimensionslosen Zeit, die mit der Gleichung 6.5 ermittelt wird:

$$D(\tau) = \frac{1}{[n(n+1)]^2} \int_0^\tau \sigma^{-2} \left[\sum_{l=1}^n l \sum_{k=1}^n k \exp \left\{ -\frac{l^2 + k^2}{4n^2 \sigma^2} \right\} I_0 \left(\frac{lk}{2n^2 \sigma^2} \right) \right] d\sigma. \quad (6.5)$$

Hierbei ist n die Anzahl der Spiralen im Sensor, I_0 eine modifizierte Bessel-Funktion erster Gattung 0-ter Ordnung (Abramowitz und Stegun [2]) und σ die bei der Lösung der Differenzialgleichung neu eingeführte dimensionslose Integrationsvariable entsprechend $\sigma^2 = \frac{a(t-t')}{R^2}$ $t' \in [0, t]$. Die Gleichung 6.4 stellt einen linearen Zusammenhang zwischen der Funktion $D(\tau)$ und der mittleren Temperaturerhöhung dar, der Anstieg der Geraden ist $\frac{P_0}{\sqrt{\pi^3} R \lambda}$. Wäre τ bekannt, könnte aus dem Anstieg dieser Gerade die Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Proben bestimmt werden. τ ist jedoch unbekannt, da die Temperaturleitfähigkeit a in der Gleichung 6.3 nicht bekannt ist.

Für die korrekte Berechnung der Wärmeleitfähigkeit aus dem Anstieg wird eine Reihe von Computerplots von $\Delta \bar{T}$ über $D(\tau)$ durchgeführt und die Wärmeleitfähigkeit iterativ bestimmt. Diese Bestimmung gelingt besser, wenn die Wärmekapazität c_p und die Dichte der Proben ρ bei der Auswertung vorgegeben werden.

Bei der Analyse der ausgewerteten gemessenen thermophysikalischen Eigenschaften gibt es spezielle Bedingungen und Definitionen, die in der ISO 22007-2 Norm erläutert werden. Der erste Parameter ist die Eindringtiefe, die zeigt, wie tief die Wärme in die Probe während der Messung eingedrungen ist. Dieser Parameter muss kleiner sein als die Abmessung der Probe selbst. Der zweite Parameter ist die dimensionslose Zeit (Gleichung 6.3), die von Sensitivitätskoeffizienten abhängt. Die Sensitivitätskoeffizienten der Wärmeleitfähigkeit β_λ und der Temperaturleitfähigkeit β_a werden mathematisch folgendermaßen bestimmt:

$$\beta_\lambda = \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial \lambda} \right|_{x,t=const} \quad \beta_a = a \left. \frac{\partial T}{\partial a} \right|_{x,t=const} \quad (6.6)$$

dabei ist $T(x,t)$ die ungemittelte Temperaturfunktion, die bei He [37] angegeben ist. Bohac u. a. [14] präsentieren den Zusammenhang zwischen der Summe beider Sensitivitätskoeffizienten $\beta_\lambda + \beta_a$ und dem Quadrat der dimensionslosen Zeit (Abbildung 6.6).

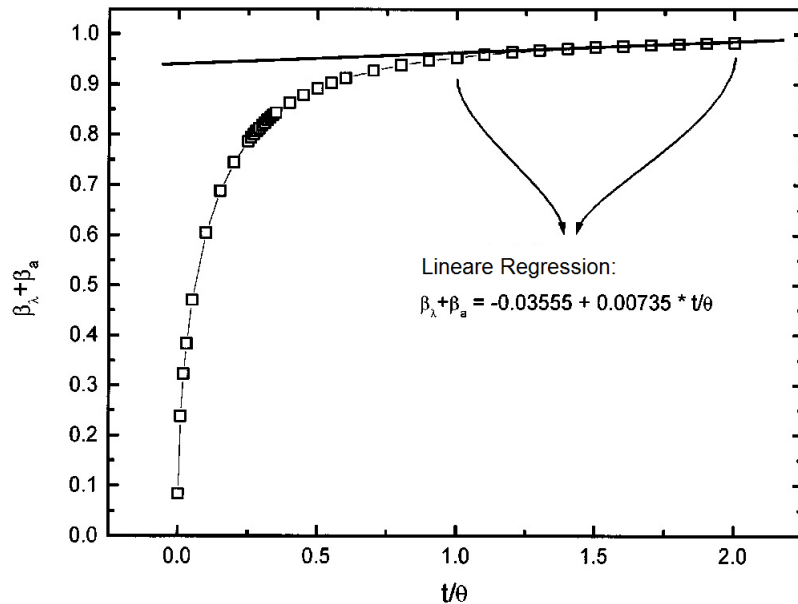


Abb. 6.6: Summe der Sensitivitätskoeffizienten als Funktion des Quadrates der dimensionslosen Zeit $\tau^2 = t/\theta = \frac{at}{R^2}$ (TPS, Bohac u. a. [14])

Man kann erkennen, dass für Werte $\frac{t}{\theta} = \frac{at}{R^2} > 1$ ein linearer Zusammenhang besteht. Es ist nicht möglich, aus einer Geraden zwei unbekannte Sensitivitätskoeffizienten zu bestimm-

men. Aus diesem Grund befindet sich der optimale Bereich der dimensionslosen Zeit für die Bestimmung der Sensitivitätskoeffizienten und damit der Wärmeleitfähigkeit und der Temperaturleitfähigkeit im Bereich dimensionsloser Zeiten $\frac{t}{\theta} < 1$. Andererseits ist im Bereich $0 \leq \tau^2 \leq 0,33$ die Summe der Sensitivitätskoeffizienten fehlerbehaftet, weil dieser Bereich den Anfang der Messungen darstellt und die Wärme sich noch nicht genügend in der Probe ausgebreitet hat. Dies führt dazu, dass die dimensionslose Zeit im Bereich $0,33 \leq t/\theta \leq 1,0$ liegen soll. Ausführlich werden die optimalen Parameter bei *Bohac u. a. [14]* dargestellt. Die optimale Sensorgröße wird in Abhängigkeit von den Abmessungen der zu messenden Materialien ausgewählt. Die Dicke der Probe darf nicht kleiner sein als der Sensorradius und in der Breite muss der Abstand vom Sensorrand zum Probenrand größer sein als der Sensorradius. Die Abbildung 6.7 stellt den Sensorabstand dar.

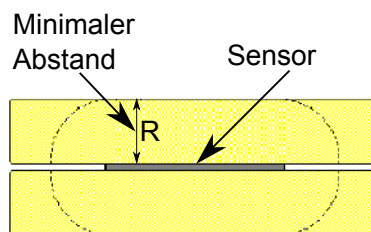


Abb. 6.7: Sensorabstand, Betriebsanleitung TPS 2500S

Die Messungen mit dem Hot-Disk Messverfahren wurden während der ersten Phase der Arbeit an der vorliegenden Dissertation (Juli 2010 bis September 2011) am IFAM durchgeführt. Seither steht eine gleichartige Apparatur am IWT der TU Bergakademie Freiberg zur Verfügung und alle weiteren Messungen wurden damit durchgeführt. Das Messgerät (Typ TPS 2500S) ist durch die folgenden Eigenschaften gekennzeichnet (Herstellerangaben):

- Messbereich der Wärmeleitfähigkeit: 0,005 – 500 W/(m K);
- Messbereich der Temperaturleitfähigkeit: 0,1 – 100 mm²/s;
- Messbereich der volumetrischen Wärmekapazität: bis 5 MJ/(m³K);
- Temperaturbereich: –100 bis 750 °C (1000 °C) je nach Sensormaterial, Gasatmosphäre und Temperierequipment;
- Wiederholbarkeit bei Standardmessungen besser 1 %;
- Genauigkeit bei Standardmessungen besser 5 %.

Das Messsystem besteht aus dem Messgerät, dem Sensor, dem Raumtemperaturprobenhalter, dem Hochtemperaturprobenhalter, dem Ofen und dem Computer. Alle Einzelkomponenten werden in der Betriebsanleitung im Detail beschrieben. Als Isolationsschichten

für die Sensoren werden Polyimide (Kapton) von tiefen Temperaturen bis ca. 300 °C unter Luftatmosphäre oder Glimmer (Mica) von 300 °C bis 720 °C unter Schutzgasatmosphäre verwendet. Der Kapton-Sensor wird in der Abbildung 6.8 dargestellt.

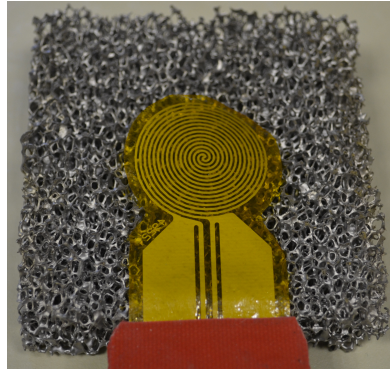


Abb. 6.8: Kapton-Sensor mit dem Durchmesser 29,2 mm (TPS)

Die Dicke der Kapton-Schicht beträgt 12,7 μm oder 25 μm , so dass die Gesamtdicke des Sensors zwischen 60 und 80 μm liegt. Die Mica-Schicht ist mit ca. 0,1 mm etwas dicker, so dass die Gesamtdicke des Sensors ca. 0,25 mm beträgt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Hochtemperaturmessungen bis 250 °C mit den Kapton-Sensoren durchgeführt. Sensoren werden in verschiedenen Abmessungen gebaut, so dass es möglich ist, verschiedene Probengrößen zu messen. Kapton-Sensoren, die nur bei Raumtemperatur eingesetzt werden, sind bereits mit einem Kabel versehen. Die Sensoren für den Einsatz bis 300 °C benötigen einen speziellen externen Anschluss und werden deshalb nur mit Kontaktstellen, aber ohne Kabel geliefert. Die verwendeten Sensorgrößen und -typen sind in der Tabelle 6.1 präsentiert.

Tab. 6.1: Eingesetzte Kapton-Sensorgrößen

Durchmesser (mm)	Temperaturbereich
6,4	RT
12,8	RT
29,2	RT
6,4	HT
12,8	HT

RT - Raumtemperaturmessungen
HT - Hochtemperaturmessungen

Der Sensor wird zwischen zwei identischen Probekörpern platziert und in einen Probenhalter eingebracht. Die Messaufbau für Raumtemperaturmessungen ist in der Abbildung 6.9 dargestellt.

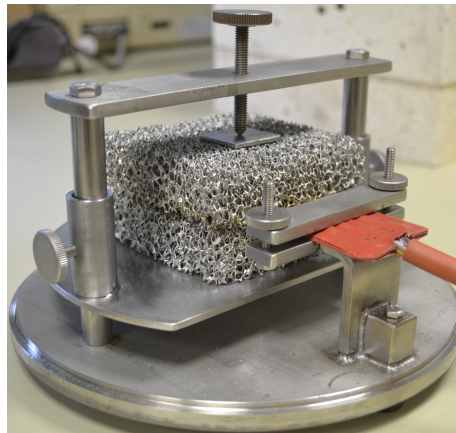


Abb. 6.9: Messaufbau für die Raumtemperaturmessungen (TPS)

Dabei wird der Sensor so gelegt, dass sich die Fixierungsschraube mit der kleinen Platte oben auf der Probe genau in der Mitte des Sensors befindet. Durch das Festziehen der Schraube wird eine bessere Kontaktierung zwischen Proben und Sensor erreicht. Die aufgebauten Proben mit dem Sensor in der Mitte werden mit einem Deckel abgedeckt, so dass keine thermische Störungen von außen die Messungen beeinflussen. Die maximalen Abmessungen der Proben, die in diesen Probenhalter eingesetzt werden können, betragen in der Dicke 30 mm für jede Probe und im Durchmesser 50 mm. Für größere Proben werden die Messungen ohne Probenhalter durchgeführt.

Für die Hochtemperaturmessungen wird ein anderer Typ von Probenhaltern eingesetzt. Dieser Probenhalter besteht aus einer Keramikplatte, auf der zwei metallische Stäbe die Kontaktpunkte des Sensors berühren. Diese metallischen Stäbe sind mit einem Hochtemperaturkabel verbunden, das an das Messgerät angeschlossen ist. Der Probenhalter wird mit zusätzlich untergelegten Stahlplatten verschiedener Dicke an die Höhe der untersuchten Materialien angepasst. Diese Konstruktion des Hochtemperaturprobenhalters wurde in der Werkstatt des Institutes für Wärmetechnik und Thermodynamik entwickelt, weil der standardmäßig gelieferte Hochtemperaturprobenhalter nur Proben mit der maximalen Dicke von 30 mm für jede Probe und dem Durchmesser 50 mm aufnehmen kann. Für die bessere Kontaktierung der zu untersuchenden Materialien mit dem Sensor werden die Proben zusätzlich mit einer aufgelegten Stahlplatte beschwert. Der Hochtemperaturprobenhalter wird in der Abbildung 6.10 dargestellt.

Für die Durchführung der Messungen wird eine spezielle Software des Herstellers verwendet. Dabei müssen verschiedene Parameter angegeben werden, wie die Heizleistung, die Messzeit, der Sensortyp (Kapton oder Mica), die Sensorgröße und die Temperatur der Probe.

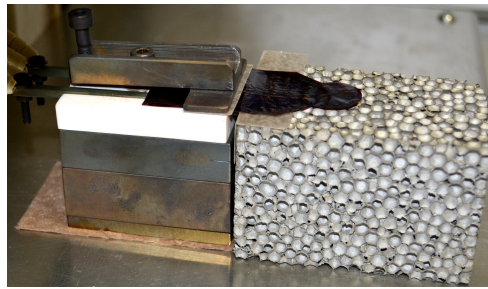


Abb. 6.10: Messaufbau für die Hochtemperaturmessungen (TPS)

In den ersten 40 Sekunden nach dem Starten der Messung wird die Temperaturdrift des Sensors im unbeheizten Zustand aufgezeichnet und es wird geprüft, ob sich über diese Zeit keine steigende oder fallende Tendenz zeigt. Das ist eine Voraussetzung für optimale Messergebnisse. Die Messungen werden stark selbst durch kleinere Temperaturänderung beeinflusst, weil sich bei der Messung insgesamt nur ein sehr kleiner Temperaturhub ergibt. Eine ideale Anfangskurve (mit ausschließlich statistischer Streuung) einer offenzelligen Metallstruktur aus FeCrAl mit $d_{por} = 3,6$ mm ist in der Abbildung 6.11 präsentiert. Steigt oder fällt die Temperatur des Sensors während dieser unbeheizten Phase, ist das ein Anzeichen dafür, dass die Proben temperatur nicht der Raumtemperatur entspricht. Solche Einflüsse können in der Auswertung nur bedingt kompensiert werden.

Danach heizt der Sensor während der vorgegebenen Heizdauer und gleichzeitig wird zeitabhängig die Temperatur des Sensors gemessen. Der gesamte Temperaturanstieg des Sensors liegt im Falle optimaler Parametereinstellung im Bereich 0,2 bis 5 K (*Bohac u. a. [14]*). Eine typische Messkurve für eine offenzellige FeCrAl-Struktur ($d_{por} = 3,6$ mm) ist in der Abbildung 6.12 dargestellt.

Dabei wurden alle verfügbaren 200 Messpunkte in das Diagramm eingetragen. Für die Auswertung empfiehlt der Hersteller des Gerätes, die ersten 20 – 30 Messpunkte abzuschneiden, weil diese Daten durch Anfangseffekte fehlerhaft sind. Dazu trägt beispielsweise die Wärmekapazität des Sensors bei. Nachdem der Auswertungsbereich ausgewählt wurde, wird die Berechnung durchgeführt. Dabei gibt es noch die Möglichkeit, die eventuell bekannte volumetrische Wärmekapazität des Probenmaterials anzugeben. Nach Angabe aller dieser obengenannten Parameter wird in der Software eine numerische Anpassung der Modellkurve an die Messwerte durchgeführt. In der Abbildung 6.13 wird die Abweichung zwischen Modell und Messung im gesamten ausgewählten Bereich präsentiert.

Auf der rechten Seite dieser Abbildung sind die Messergebnisse zusammengefasst. Die oberen drei Werte sind die thermophysikalischen Eigenschaften des Materials: Wärmeleitfähigkeit, Temperaturleitfähigkeit und volumetrische Wärmekapazität. Für die Bewertung der Messergebnisse sind die Rechnungsparameter sehr wichtig, die unter den gemessenen

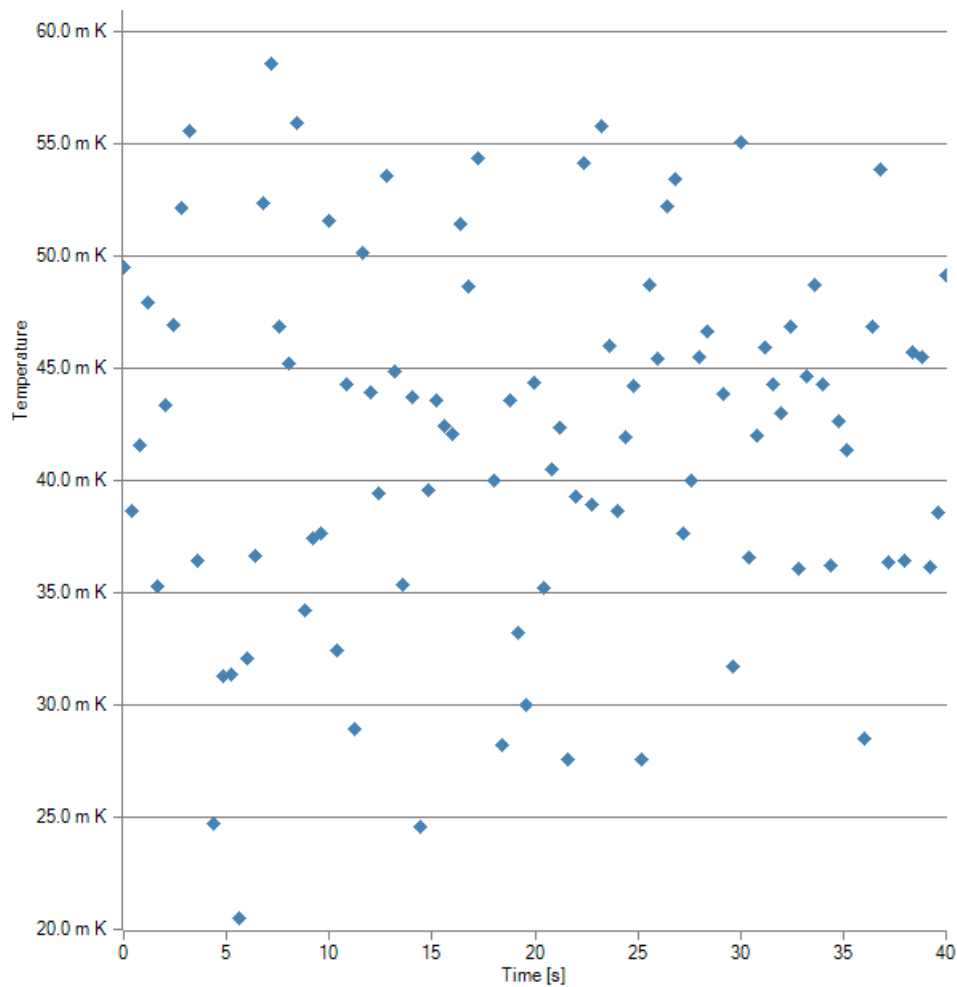


Abb. 6.11: Anzeige der Temperaturdrift im Sensor in den ersten 40 Sekunden vor dem Beginn der Messungsdurchführung (TPS, statistische Streuung)

Eigenschaften gezeigt werden. Die Bedeutung dieser Parameter ist in der ISO 22007-2 erläutert. Der erste Parameter ist die Eindringtiefe, die zeigt, wie tief die Wärme in die Probe während der Messung eingedrungen ist. Dieser Parameter muss kleiner sein als die Abmessung der Probe selbst. Der zweite Parameter ist die Temperaturerhöhung, die im Bereich zwischen 1 – 2 K liegen muss oder am Endpunkt der Messkurve in der Abbildung 6.12 zwischen 1 und 5 K liegen darf. Die dimensionslose Zeit (Gleichung 6.3) muss zwischen 0,33 und 1 liegen, wie bereits oben erklärt wurde. Ein letzter wichtiger Parameter ist die mittlere Abweichung, die zahlenmäßig die Abweichung des Modells von der Messkurve darstellt. Je kleiner dieser Parameter ist, desto besser passt das Modell zur Messkurve. Alle diese Parameter müssen beachtet werden um sicherzustellen, dass die Messergebnisse tatsächliche thermophysikalische Eigenschaften der untersuchten Proben wiedergeben. Da sie erst bei der Messung ermittelt werden, sind oftmals mehrere Testläufe und damit verbunden auch Wartezeiten für die Probenabkühlung erforderlich, um Leistung und Messdauer für die zu messende Konfiguration herauszufinden. Dieser ite-

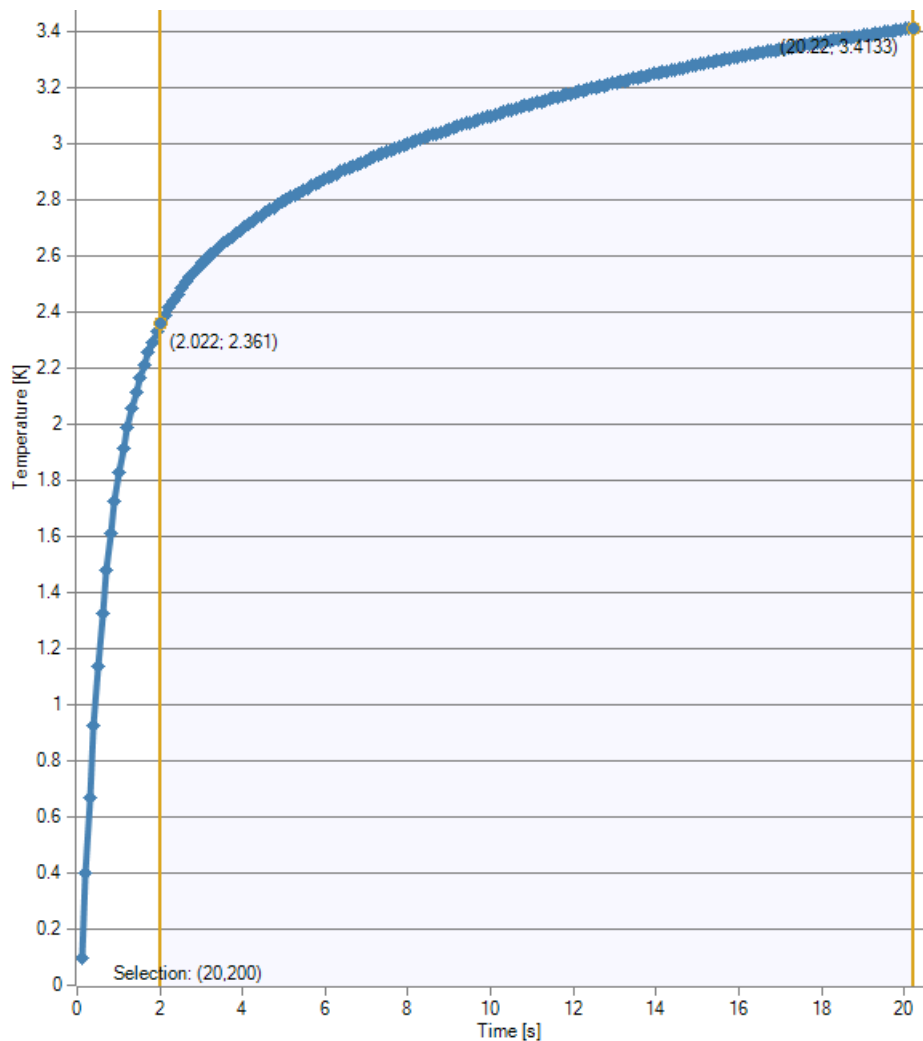


Abb. 6.12: Messkurve des TPS Messverfahrens

rative Prozess stellt den größten Aufwand beim Hot-Disk-Verfahren dar. Der eigentliche Messvorgang dauert dann maximal 1280 s.

Bei der Anwendung des TPS-Verfahrens ist eine spezielle Probenpräparation erforderlich. Bei den offenzelligen Strukturen (HO, MP, IFAM) und den geschlossenzelligen Hohlkugelstrukturen (IFAM) wurden die Oberflächen für die bessere Kontaktierung zwischen Proben und Sensor erodiert. Ohne Oberflächenpräparation war es nicht möglich, vernünftige Wärmeleitfähigkeitswerte zu bestimmen. Dies wird später bei der Darstellung der Messergebnisse im Kapitel 7 präsentiert. Dabei ist es nicht möglich, zur Verbesserung der Kontaktierung eine Zwischenlage oder eine spezielle Beschichtung einzusetzen, weil das TPS-Verfahren die gemessenen thermophysikalischen Eigenschaften nicht einer bestimmten Schicht zuordnen kann. Aus diesem Grund ist es auch nicht möglich, Schichtstrukturen zu untersuchen. Bei den aufgeschäumten Strukturen (IWU) und den offenzelligen Strukturen (CM) war eine Oberflächenpräparation nicht notwendig, weil die gute Kontaktierung

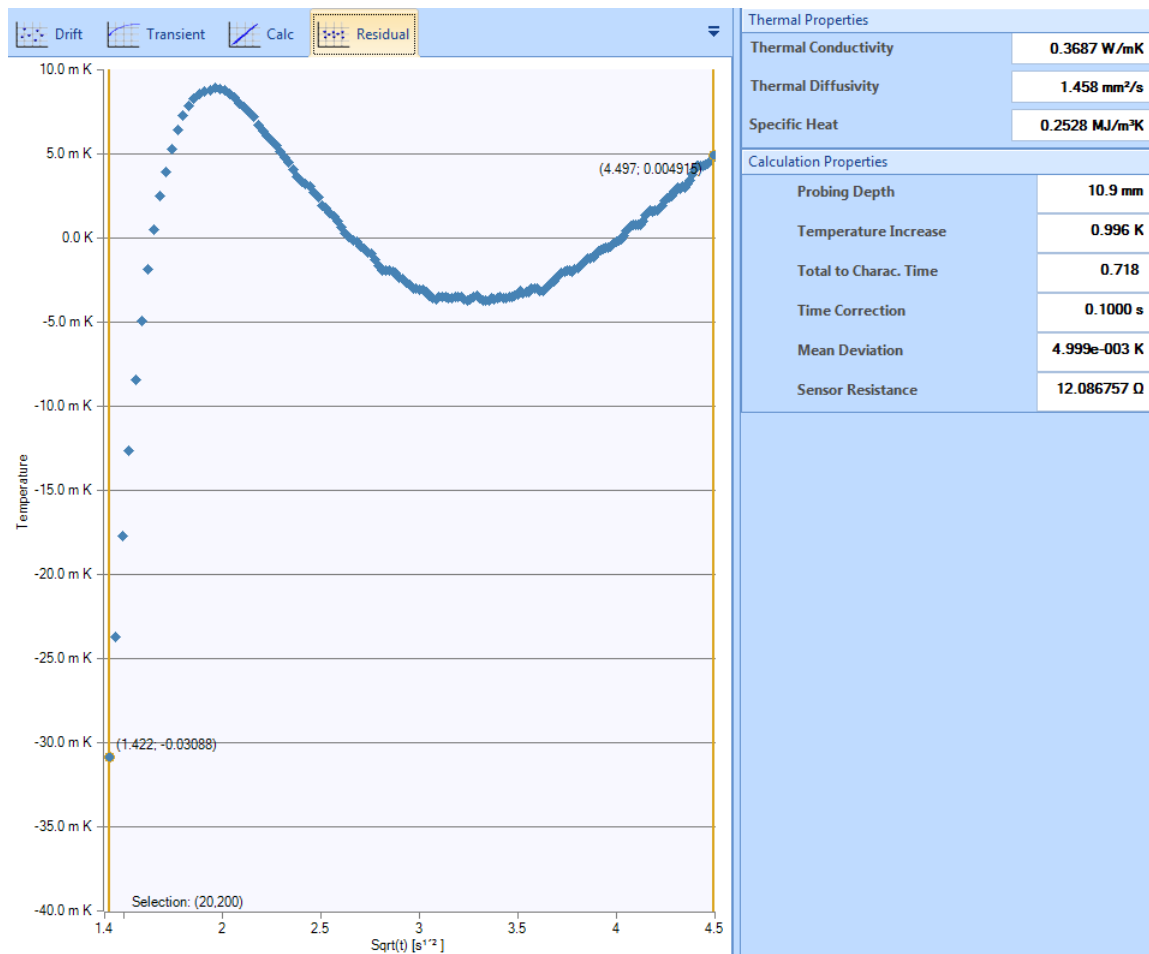


Abb. 6.13: Messergebnisse und Anpassung des Modells an die Messwerte (TPS)

schon vorhanden war. Bei der Durchführung der Messungen wurde die volumetrische Wärmekapazität soweit möglich vorgeben oder immer als Maß (Kontrollwert) für die optimale Durchführung der Messungen berücksichtigt. Die volumetrische Wärmekapazität der zellularen metallischen Strukturen ρc_p wurde dabei aus den spezifischen Wärmekapazitäten des Feststoffes (c_{pF}) und der Luft ($c_p = 1005 \text{ J}/(\text{kg K})$), der Porosität ε und den Dichten des Feststoffes ρ_F und der Luft ρ_G mit folgender Gleichung berechnet

$$\rho c_p = (1 - \varepsilon) (\rho_F c_{pF}) + \varepsilon (\rho_G c_{pG}). \quad (6.7)$$

Die Auswahl der Sensorgröße richtete sich grundsätzlich nach der Größe der verfügbaren Proben. Größere Sensoren haben dabei immer den Vorteil, dass sie eine größere und damit repräsentative Probenoberfläche abdecken.

6.2.2 Laser-Flash-Verfahren

Die Messungen mit dem Laser-Flash-Verfahren (Typ LFA 427, Firma Netzsch Gerätebau) wurden am IWTT der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt. Die Messung erfolgt gemäß DIN EN 821-2:2005. Die üblichen Probengeometrien sind Tabletten mit dem Durchmesser 6 – 12,6 mm oder quadratische Proben der Abmessung 10 mm x 10 mm. Die Probendicke beträgt je nach Material 1 – 5 mm. Der Temperaturbereich geht bis 2000 °C und mögliche Gasatmosphären sind Luft, Stickstoff, Argon und Helium. Abbildung 6.14 präsentiert eine schematische Darstellung der Messanlage. Das Messprinzip wird von *Blumm*

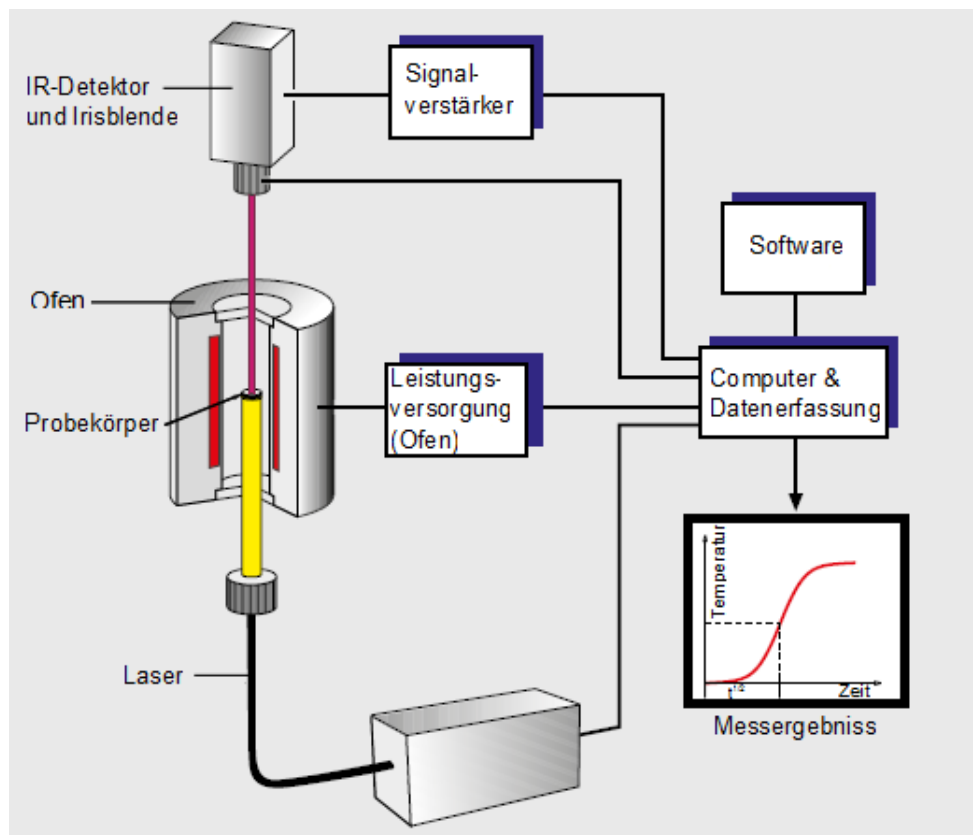


Abb. 6.14: Schematische Darstellung des Laser-Flash-Verfahrens [Quelle: Netzsch]

[13] ausführlich beschrieben. Die Probe wird im Ofenraum auf die notwendige Temperatur gebracht. Danach wird die untere Seite der Probe mit einem kurzen Laserpuls ($< 1\text{ms}$) erwärmt. Die Temperaturänderung auf der Probenoberseite wird über der Zeit mit einem Infrarotdetektor aufgezeichnet (Schusskurve). Die Temperaturleitfähigkeit wird aus dem Verlauf dieser Kurve bestimmt, wobei die folgende Gleichung für den vereinfachten adiabaten Fall gilt:

$$a = 0,1337 \frac{d^2}{t_{1/2}}. \quad (6.8)$$

Dabei ist d die Dicke der Probe, $t_{1/2}$ ist die Zeit, während der das Messsignal die Hälfte des gesamten Temperaturanstieges erreicht.

Die Probenanforderungen sind planparallele Oberflächen, homogenes Material, eine gute Absorption der Laserstrahlung an der Oberfläche und keine zu hohe Transparenz. Aus diesem Grund wurden nur zwei Materialien mit sehr kleinen Poren für die Untersuchungen mit dieser Apparatur ausgewählt. Zur Messung der offenzelligen Proben aus FeCrAl mit den Porendurchmessern des PU-Schaumes von 0,9 mm und 1,3 mm war außerdem eine spezielle Probenpräparation erforderlich. Bei den quaderförmigen Proben mit den Abmessungen von ca. 12 mm x 12 mm x 4,6 mm wurden die Poren auf beiden Seiten mit einer dünnen Schicht aus SiC-Paste verschlossen. Damit sollte die Durchstrahlung verhindert und eine ebene Fläche auch für den Detektor geschaffen werden. Die Probenunterseite wurde zusätzlich mit Graphit-Spray behandelt, um die Absorption zu verbessern. Daher ist schon die Angabe einer definierten Probendicke für die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit nach der Gleichung 6.8 schwierig. Die Messungen wurden in Stickstoffatmosphäre im Temperaturbereich 20 - 700 °C durchgeführt und die Proben auf Grund ihrer Größe auf dem Probenhalter positioniert. Um die Wärmeleitfähigkeit nach der Gleichung 4.2 berechnen zu können, müssen noch die spezifische Wärmekapazität c_p und die Dichte ρ bestimmt werden. Die Wärmekapazität wird durch das Neumann/Kopp-Gesetz ermittelt:

$$c_p = \frac{m_G}{m_{zell}} c_{pG} + \frac{m_F}{m_{zell}} c_{pF} \quad (6.9)$$

Dabei ist m_G die Masse des Fluids. Bei den untersuchten Strukturen ist es die Masse der Luft. m_{zell} ist die Masse der zellularen Struktur insgesamt und m_F die Masse des Feststoffes (Metall). c_{pG} ist die spezifische Wärmekapazität der Luft und c_{pF} die spezifische Wärmekapazität des Feststoffes. Da $m_G \ll m_F$ unterscheidet sich die spezifische Wärmekapazität der porösen Struktur kaum von der des Feststoffes.

6.3 Aufgetretene Probleme bei der Durchführung der Messungen

Für die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der zellularen metallischen Strukturen wurden, wie schon erwähnt, drei Messverfahren eingesetzt. Bei jeder Messmethode sind bestimmte Probleme aufgetreten, die durch die Besonderheiten der untersuchten

Materialien und die Messoptionen der Messverfahren entstanden sind. In diesem Kapitel werden die Probleme bei den Messungen mit den entsprechenden Messapparaturen erläutert.

6.3.1 TPS-Messverfahren

Das TPS-Messverfahren wurde für alle untersuchten Materialien eingesetzt. Die Messungen mit der Methode sind schnell durchzuführen und einfach im Messaufbau. Aber für optimale Messergebnisse müssen bestimmte Messbedingungen erfüllt sein. Es muss zunächst ein guter Kontakt zwischen den Proben und dem Sensor vorhanden sein. Die Oberflächen der untersuchten zellularen metallischen Strukturen wurden daher speziell präpariert. Der Einfluss der Probenpräparation wird im Kapitel 7.1 dargestellt. Speziell in Bezug auf die Probengröße und die Porengröße muss ein passender Sensor ausgewählt werden. Die richtige Reihenfolge für die Sensorauswahl ist, dass man für die vorliegende Porengröße die dazu geeignete Sensorgröße bestimmt und dann das zu untersuchende Material in der nötigen Größe zuschneidet. Bedingt durch den Herstellungsprozess lassen sich aber nicht immer ausreichend große Proben herstellen. Kleine Proben mit großen Zelldurchmessern lassen sich daher unter Umständen nicht messen.

Bei der Analyse der gewonnenen Messergebnisse müssen drei Parameter im optimalen Bereich liegen, die bereits im Kapitel 6.2.1 dargestellt sind. Das sind die Wärmeeindringtiefe, die dimensionslose Zeit und die Temperaturerhöhung. Die Wärmeeindringtiefe darf nicht die Probengröße überschreiten. Die dimensionslose Zeit muss zwischen 0,3 und 1 betragen. Die Temperaturerhöhung muss im Bereich zwischen 1 K und 2 K liegen. Bei gut leitenden Materialien darf die Temperaturerhöhung auch einen etwas niedrigeren Wert (ab 0,3 K) haben¹. Außerdem muss die gemessene Wärmekapazität im erwarteten Bereich der untersuchten Materialien liegen. In manchen Fällen muss die Wärmekapazität bei der Auswertung der Messung angegeben werden, um sinnvolle Ergebnisse zu erreichen. Um alle diese Bedingungen zu erfüllen, war es nötig, bei einigen Materialien zahlreiche Messungen durchzuführen. Außerdem muss die Wartezeit zwischen den Messungen bei Raumtemperatur mindesten 15 Minuten betragen, so dass sich die Temperatur im Sensor nach der Messung stabilisiert. In Summe sind daher teilweise erhebliche Messzeiten pro Material notwendig, obwohl die Einzelmessung sehr schnell geht. Besonders schwierig waren die Messungen bei den aufgeschäumten Strukturen (IWU). Die Tabelle 6.15 präsentiert einen Ausschnitt aus dem Messprotokoll mit insgesamt 11 Messungen für dieses

¹Diese Information wurde vom Hersteller beim Anwendertreffen des TPS-Verfahrens am 08.05.2012 in Kassel gegeben.

Material bei Raumtemperatur. Rot markierte Felder zeigen die Über- und Unterschreitung von zulässigen Parametern an. Im grünen Feld sind alle Parameter im optimalen Bereich.

Test-Nr.	01	01			04	05	06			11	11
Messdauer in sec	5	5			40	80	80			5	5
Heizleistung in W	0,500	0,500			3,000	3,000	4,000			3,000	3,000
λ in W/(mK)	10,31	19,6			46,86	47,44	76774			10,33	20,03
a in mm ² /s	404,2	21,07			7,991	1,456	294,1			423	21,53
ρc_p in MJ/(m ³ K)	0,025				5,864	32,57	261,1			0,024	
Vorgabe		0,93									0,9302
Wärmeeindringtiefe Δp in mm	89,90	20,50			35,80	21,60	307,00			92,00	20,80
Temperaturerhöhung in K	0,140	0,140			0,213	0,208	0,001			0,814	0,814
dimensionslose Zeit	9,480	0,494			1,500	0,547	110,000			9,920	0,505

Abb. 6.15: Ausschnitt aus dem Messprotokoll für eine aufgeschäumte Struktur aus AlSiMg0,5 ($d_{por} = 1,2 - 8,2 \text{ mm}$, Raumtemperatur, IWU)

Bei der ersten Messung wurde die minimale Heizleistung verwendet, um des Messverhalten der untersuchten Proben zu testen. Dabei wurden zwei Auswertungen durchgeführt, eine ohne und eine mit Vorgabe der Wärmekapazität. Bei der vierten und fünften Messung wurde die Messdauer verdoppelt, so dass die dimensionslose Zeit im optimalen Bereich lag, aber die Temperaturerhöhung war noch nicht optimal. Aus diesem Grund wurde die Heizleistung bei der nächsten Messung erhöht. Dabei erreichte die dimensionslose Zeit unerwartet einen extrem hohen Wert und gleichzeitig überschritt die Wärmeeindringtiefe die Abmessung der Probe (120 mm x 120 mm x 120 mm) erheblich. Die letzte Messung wurde zuerst ohne vorgegebene Wärmekapazität durchgeführt, was zu einem unzulässigen Wert der dimensionslosen Zeit führte. Erst mit vorgegebener Wärmekapazität waren dann alle Parameter im optimalen Bereich, was kein gutes Zeichen für die gewonnenen Werte der thermophysikalischen Eigenschaften ist.

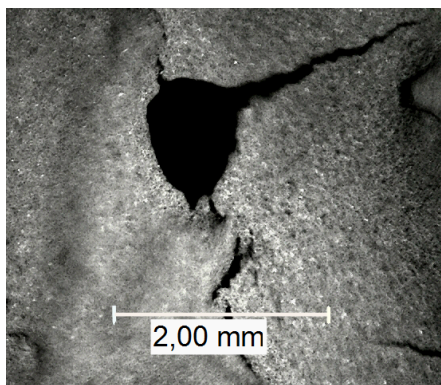
Bei den Hochtemperaturmessungen sind noch weitere Probleme aufgetreten. Beim Probenaufbau dürfen die elektrisch leitenden Materialien nicht direkt mit dem Hochtemperaturprobenhalter kontaktieren, weil dann bei der Durchführung der Messung ein Kurzschluss auftreten kann. Dafür wird eine elektrische Isolierschicht auf die Seite der Probe gelegt. Das nächste Problem betrifft die optimale Wahl der Regelparameter des Ofens in Abhängigkeit von der Zieltemperatur, so dass diese ohne großes Überspringen und möglichst schnell erreicht wird. Bei der Erstellung des Hochtemperaturprogramms für die Durchführung der Messungen ist es nicht möglich, für jeden Temperaturschritt die Reglerparameter vorzugeben. Das erschwert insbesondere die Messungen bei erhöhten Temperaturen. Nach der Durchführung der Hochtemperaturmessungen haben sich die Sensoren verfärbt und sind spröder geworden. Welchen Einfluss die Alterung der Sensoren auf die Messergebnisse

hat, ist eine noch offene Frage, die im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden konnte.

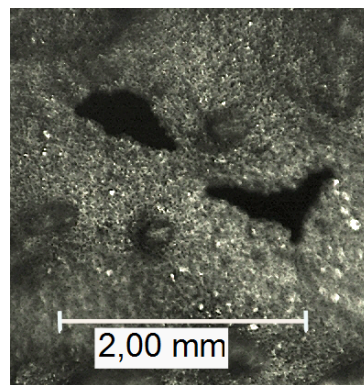
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Anwendung der TPS Methode viel Erfahrung erfordert und auch bestimmte Probleme mit sich bringt. Auf diesem Grund werden die Untersuchungen mit dieser Methode auch zukünftig viel Zeit in Anspruch nehmen.

6.3.2 Laser-Flash-Verfahren

Die nächste eingesetzte Messmethode ist das Laser-Flash-Verfahren, das im Kapitel 6.2.2 beschrieben wurde. Die Probenpräparation für die optimale Durchführung der Messungen ist sehr schwierig, weil man bei den offenzelligen Strukturen die Poren schließen muss. Die Abbildung 6.16 präsentiert zwei solche Proben.



(a) $d_{por} = 1,3 \text{ mm}$ mit SiC-Beschichtung



(b) $d_{por} = 0,9 \text{ mm}$ mit SiC+Graphit-Beschichtung

Abb. 6.16: Präparierte offenzellige Metallschaum-Probe aus FeCrAl (HO) für die LFA-Messungen

Wie regelmäßig und wie dicht die Poren geschlossen sind, ist schwierig zu analysieren. Außerdem ist es nicht bekannt, wie groß der Einfluss dieser Probenpräparation auf die Messergebnisse ist. Dabei ist es auch nicht möglich, die Dicke der Proben genau zu definieren. Daher ist die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit in jedem Fall fehlerbehaftet, ohne dass man diesen Fehler quantifizieren kann.

Das nächste Problem stellt die kleine Probenabmessung dar. Die Proben, die gemessen werden können, sind quadratisch mit ca. 12 mm x 12 mm. Aus diesem Grund wurden nur die zwei offenzelligen Strukturen aus FeCrAl mit den kleinsten Porenabmessungen ($d_{por} = 0,9 \text{ mm}$ und $d_{por} = 1,3 \text{ mm}$) mit einer Dicke von 4,6 mm untersucht. Die Messergebnisse sind in der Abbildung 6.17 präsentiert.

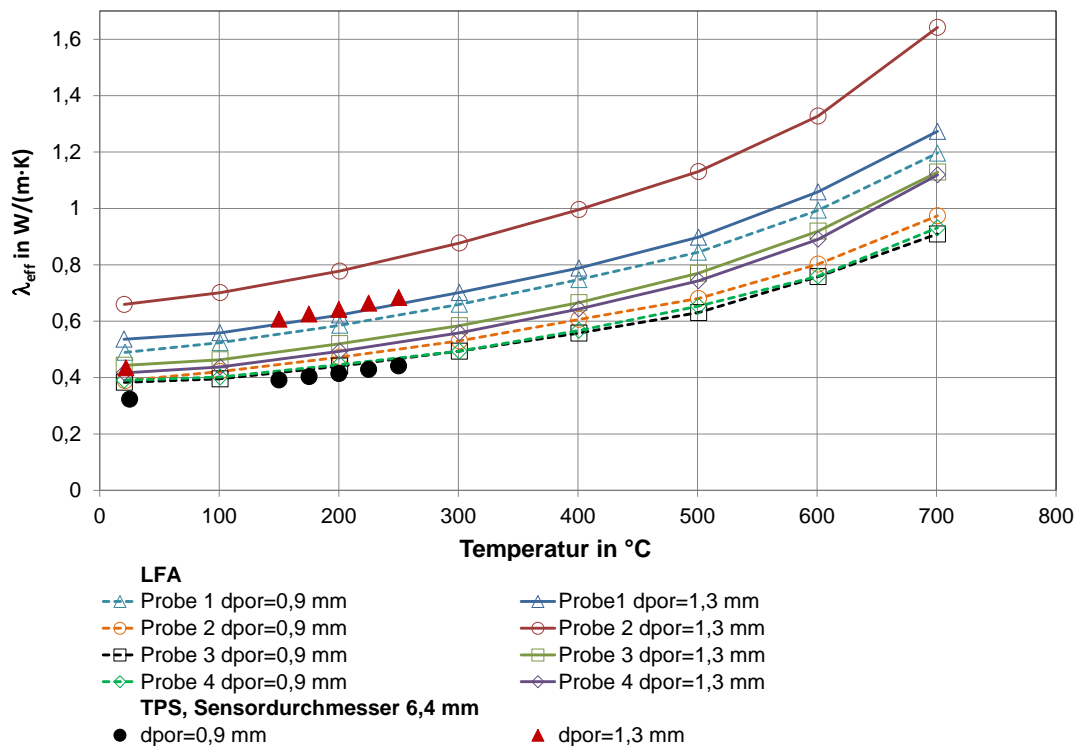


Abb. 6.17: Vergleich der Messergebnisse von LFA und TPS für offenzellige Strukturen aus FeCrAl ($d_{por} = 0,9 \text{ mm}$; $d_{por} = 1,3 \text{ mm}$, HO)

Dabei wurden jeweils vier Proben mit jeder Porenabmessung gemessen. Die Messergebnisse streuen sehr stark. Dies bedeutet, dass die Probenabmessung nicht repräsentativ für die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist. Man kann nicht sicher beurteilen, welche Messergebnisse optimal und vernünftig sind. Man müsste sehr viele Proben messen und eine statistische Auswertung vornehmen, um dieses Messverfahren überhaupt für derartige Materialien einsetzen zu können. In der Abbildung 6.17 sind auch die Messwerte des TPS-Messverfahrens eingetragen. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse beider Verfahren (TPS, LFA) kaum miteinander vergleichbar sind.

6.3.3 Plattenverfahren PMA2

Die einzige stationäre Messmethode, die eingesetzt wurde, ist das Plattenverfahren PMA2. Bei dieser Methode, die bereits im Kapitel 6.1 beschrieben wurde, wird die Temperaturverteilung an der Probenoberfläche mit Thermoelementen gemessen. Bei Dämmstoffen entstehen dabei trotz großer Porosität im Allgemeinen keine Probleme, aber bei den zellularen Strukturen sind die Kontaktierungsprobleme immer dabei. Die Abbildung 6.18

präsentiert eine mikroskopische Aufnahme einer solchen Kontaktierung eines Thermoelementes auf der Oberfläche der offenzelligen AlSi7Mg0,3 -Struktur (MP).

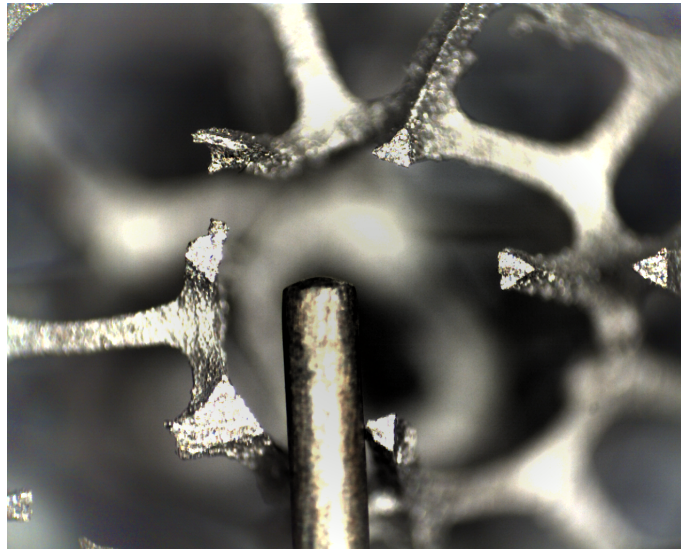


Abb. 6.18: Kontakt des Thermoelementes mit der Oberfläche der offenzelligen AlSi7Mg0,3 -Struktur (MP), Mikroskopische Aufnahme

Dabei ist immer die Frage, wo sich die Spitze des Thermoelementes befindet, kontaktiert sie den Steg oder hängt sie in der Pore in der Luft. Das nächste wichtige Problem ist die Messung von gut leitenden Strukturen. In solchen Fällen werden nur geringe Temperaturdifferenzen über der Probendicke erreicht. Beide Faktoren führten dazu, dass die Messungen bei der offenzelligen AlSi7Mg0,3 -Struktur (MP) nicht gelungen sind. Bei dieser Messung war die Abweichung der Anzeigewerte der Thermoelementen in beiden Messebenen, aber besonders auf der Unterseite der Probe extrem groß (max. 33 K). In Kombination mit der geringen Temperaturdifferenz über der Probe ergab sich eine inakzeptable Messsicherheit, so dass die Messreihe verworfen werden musste. Zur Demonstration dieses Problems sind in der Abbildung 6.19 die Abweichung der Thermoelemente jeder Messebene ($\Delta T_{\text{Schicht}}$) zur Temperaturdifferenz über der Probe ΔT_{Probe} ins Verhältnis gesetzt.

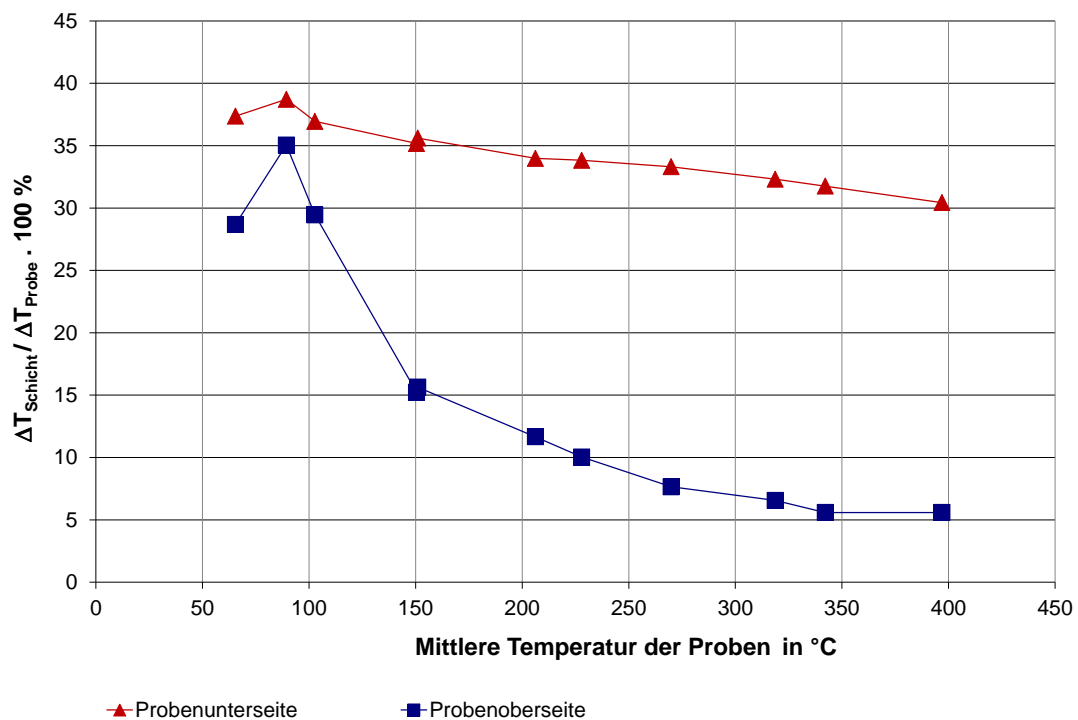


Abb. 6.19: Verhältnis der Abweichung der Anzeigewerte der einzelnen Thermoelemente einer Messebene zur Temperaturdifferenz in der Probe (AlSi7Mg0,3-Struktur, PMA2, MP)

Außerdem ist es nicht möglich, bei gut leitenden Materialien ein System aus zwei Probenschichten zu messen. Dabei entsteht ein großer Kontaktwiderstand, der die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit unmöglich macht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass alle Messverfahren bestimmte Probleme und Besonderheiten haben. Beim Einsatz dieser Messverfahren müssen die Messergebnisse immer kritisch betrachtet werden. Besonders gilt das, wenn solche komplexen Strukturen wie zellulare metallische Strukturen untersucht werden müssen.

7 Messergebnisse

Das vorliegende Kapitel präsentiert die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Wie bereits im Kapitel 6 erläutert, wurden alle Materialien bei Raumtemperatur mit dem TPS-Verfahren untersucht. Die Messungen bei höheren Temperaturen wurden aufgrund der Probengeometrie und der Materialeigenschaften nur bei ausgewählten zellularen Strukturen durchgeführt. Dafür wurden drei Messverfahren eingesetzt: das TPS-Verfahren, die Laser-Flash-Apparatur (LFA) und die Plattenapparatur PMA2. Alle Ergebnisse werden im Folgenden zusammengestellt und miteinander sowie mit den Literaturwerten verglichen. Auf Basis der Struktureigenschaften der untersuchten Materialien wird die effektive Wärmeleitfähigkeit mit ausgewählten mathematischen Modellen, die aus der Literatur entnommen wurden, berechnet und mit den eigenen Messergebnissen verglichen.

7.1 Messungen bei Raumtemperatur

Alle Materialien wurden bei Raumtemperatur mit dem TPS-Verfahren untersucht. Es ist wichtig, vor dem Starten der Experimente in Testversuchen festzustellen, welche Oberflächenpräparation notwendig ist, damit die Messungen tatsächlich zuverlässige Messwerte liefern. Die Abbildung 7.1 präsentiert die Ergebnisse solcher Analysen für ausgewählte Strukturen.

Darin ist zu erkennen, dass die Messungen an unbearbeiteten Proben unrealistisch niedrige Werte der Wärmeleitfähigkeit liefern. Die Ergebnisse liegen in diesem Fall nur bei der etwa doppelten Wärmeleitfähigkeit von Luft, was für derartige Strukturen nicht möglich ist. Durch das Schleifen der Proben verbessert sich die Kontaktierung zwischen Probe und Sensor bereits erheblich. Die gemessene Wärmeleitfähigkeit steigt um ca. 80 % gegenüber den unbearbeiteten Oberflächen an. Durch das Erodieren wird eine weitere Verbesserung erreicht. Die Unterschiede zwischen geschliffenen und erodierten Oberflächen liegen nochmals bei ca. 8 %. Dies bedeutet, dass das Erodieren am besten geeignet ist, was frühere Erfahrungen am IFAM bestätigt. Aus dieser Untersuchung lässt sich feststellen,

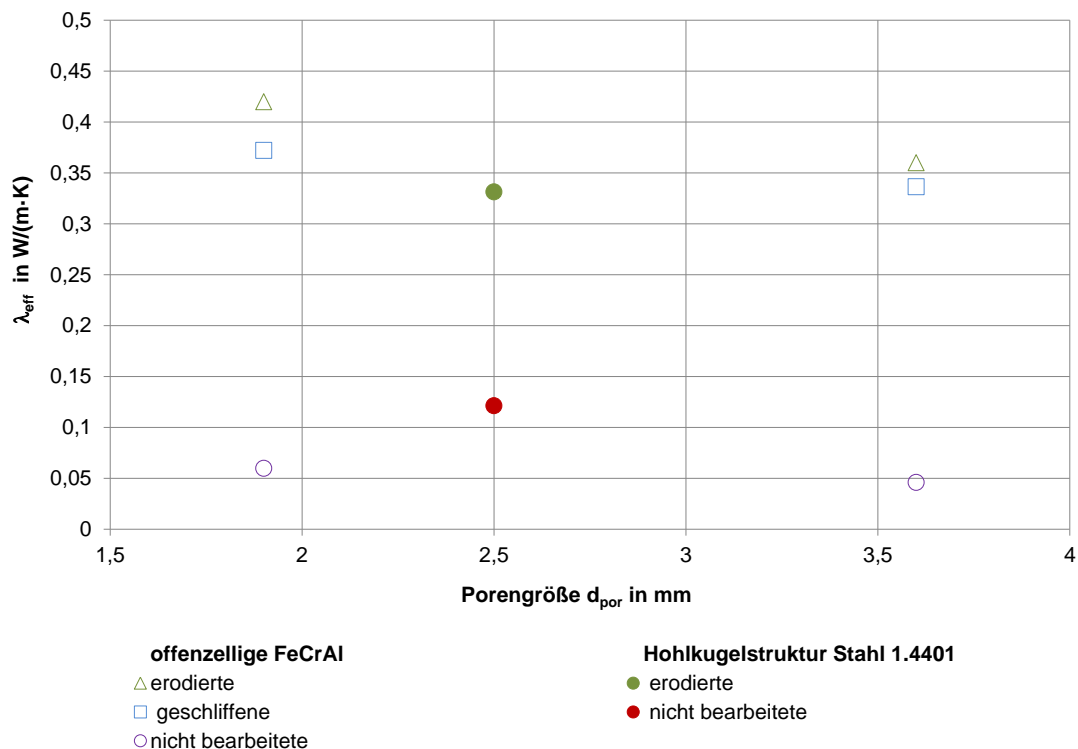


Abb. 7.1: Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) in Abhängigkeit von der Oberflächenbearbeitung für offenzellige Strukturen aus FeCrAl (HO) und eine Hohlkugelstruktur Stahl 1.4401 (IFAM)

dass die Oberflächenpräparation absolut notwendig ist, um sinnvolle Messergebnisse zu gewinnen.

7.1.1 Geschlossenzellige Strukturen

Hohlkugelstrukturen und aufgeschäumte Strukturen, wie sie im Kapitel 5.1 und 5.2 beschrieben wurden, gehören auf Grund ihres Aufbaus zu den partiell geschlossenzelligen und geschlossenzelligen Strukturen. Die Hohlkugelstrukturen aus Eisen ($E = 93\%$, $d_{\text{por}} = 2,5$ mm, IFAM), Stahl 1.4841 ($E = 95\%$, $d_{\text{por}} = 4,6$ mm; $E = 93\%$, $d_{\text{por}} = 3,8$ mm, IFAM) standen in großen Abmessungen (Platten) zur Verfügung, so dass zahlreiche Proben ausgeschnitten werden konnten. Bei diesen Strukturen war es daher möglich, die durch den strukturellen Aufbau hervorgerufene Streuung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit dem TPS-Verfahren zu bestimmen. Die Abbildung 7.2 stellt die Ergebnisse dieser Untersuchungen dar.

Dabei beträgt die maximale Streuung der effektiven Wärmeleitfähigkeit ca. 30 %. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Hohlkugelstrukturen als relativ homogene Strukturen bezeichnet werden können. Für weitere Darstellungen wurden daher Mittelwerte

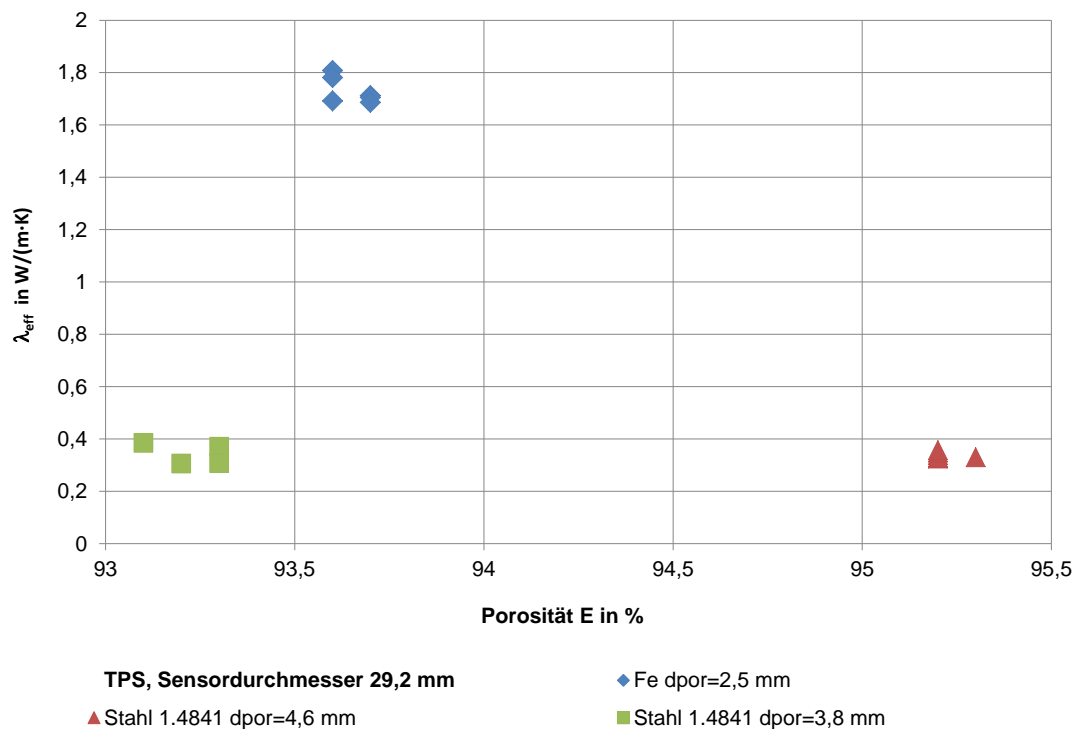


Abb. 7.2: Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) von Hohlkugelstrukturen (IFAM)

gebildet. Alle anderen Hohlkugelstrukturen lagen nur paarig vor, so dass es nicht möglich war, die Streuung zu analysieren.

Die aufgeschäumten Strukturen wurden ebenfalls paarig geliefert, so dass die Streuung nur durch Umdrehen der vorhandenen Proben und Platzierung des Sensors auf den verschiedenen Oberflächen bestimmt wurde. In der Tabelle 7.1 werden die Bereiche der effektiven Wärmeleitfähigkeit und die prozentuale maximale Abweichung vom Mittelwert angegeben.

Tab. 7.1: Streuung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von aufgeschäumten Strukturen (IWU), Sensordurchmesser 29,3 mm

Material	E (%)	λ_{eff} (W/(m K))	Abweichung (%)
AlMgSi0,5	63	17,8 - 20,9	8
	92	6,8 - 7,3	5

Dabei ist die Streuung der effektiven Wärmeleitfähigkeit relativ groß im Vergleich zur Streubreite bei den Hohlkugelstrukturen, weil die aufgeschäumten Strukturen inhomogen sind. Für weitere Analysen wurden daher die Bereiche der effektiven Wärmeleitfähigkeit dargestellt.

Die Abbildung 7.3 präsentiert die effektive Wärmeleitfähigkeit aller geschlossenzelligen Strukturen.

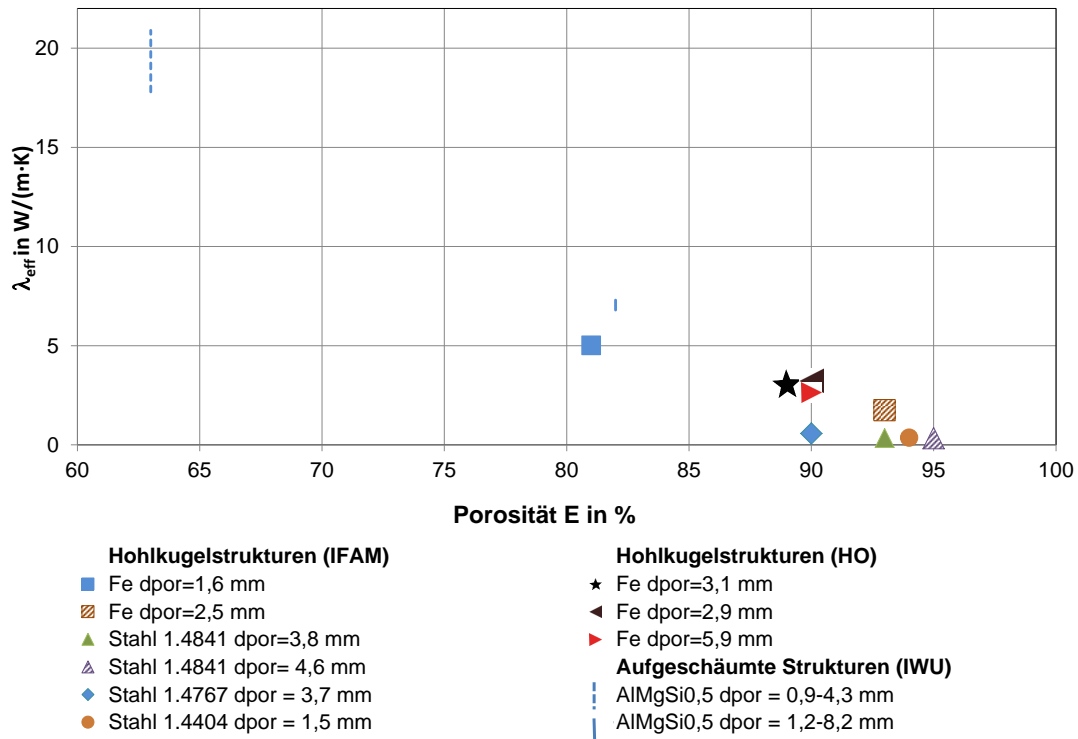


Abb. 7.3: Effektive Wärmeleitfähigkeit von geschlossenzelligen Strukturen in Abhängigkeit von der Porosität (TPS, Sensordurchmesser 29,2 mm)

Als wichtigste Tendenz ist dabei erkennbar, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit mit steigender Porosität sinkt. Dies ist dadurch zu erklären, dass der Anteil des Feststoffes mit der wesentlich höheren Wärmeleitfähigkeit mit steigender Porosität abnimmt. Außerdem ist zu sehen, dass die Porengröße keinen sichtbaren Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur hat.

Die Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der geschlossenzelligen Strukturen aus gut leitenden Metallen, wie Eisen ($\lambda_F = 80 \text{ W/(m K)}$) oder AlSiMg0,5 ($\lambda_F = 210 \text{ W/(m K)}$) sind wesentlich höher als die Werte der Strukturen aus Stahl. Dies bedeutet, dass die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes berücksichtigt werden muss, die im Kapitel 5 angegeben wurde. Um die effektive Wärmeleitfähigkeit der unterschiedlichen geschlossenzelligen Strukturen miteinander vergleichen zu können, werden diese Werte, so wie bereits im Kapitel 4.3 auf die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes bezogen. Dieser Vergleich wird im später im Kapitel 7.1.3 dargestellt.

7.1.2 Offenzellige Strukturen

Die ersten untersuchten Materialien waren die offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO), die speziell für die vorliegende Arbeit hergestellt wurden. Wie im Kapitel 5.3 bei der Materialcharakterisierung dargestellt, versuchte der Hersteller, die Porosität bei ca. 90 % zu fixieren und die Porengröße zu variieren. Mit der Porengröße $d_{por} = 1,9$ mm wurden 24 Proben hergestellt, die in Summe 12 Paare für die TPS-Versuchsanlage bildeten. Mit den Porendurchmessern $d_{por} = 2,8$ mm und $d_{por} = 7,2$ mm konnten nur vier Stück hergestellt und entsprechend je zwei Paare gebildet werden. Für die untersuchten Materialien mit den Porendurchmessern $d_{por} = 0,9$; 1,3; 4,5 mm gibt es jeweils ein Paar. Die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsbestimmung sind in der Abbildung 7.4 dargestellt. Für die Messungen wurde falls möglich der größte Sensor mit 29,2 mm Durchmesser verwendet. Ausnahmen sind die Messungen der Strukturen mit $d_{por} = 0,9$ mm und $d_{por} = 1,3$ mm. Bei diesen Strukturen konnte auf Grund der geringen Probenabmessungen nur der Sensor mit 6,4 mm Durchmesser genutzt werden.

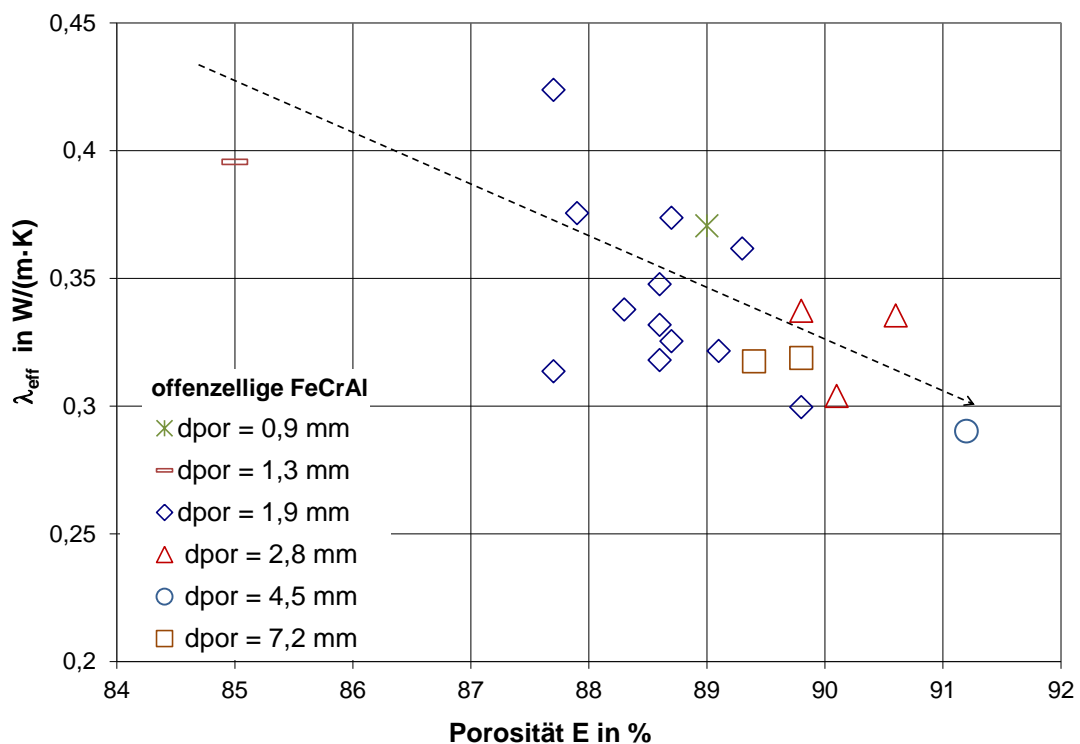


Abb. 7.4: Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) der offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO)

Die Porosität liegt im Bereich 85 – 91,5 % und die effektive Wärmeleitfähigkeit im Bereich 0,25 – 0,45 W/(m K). Die Messergebnisse zeigen, wie die Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei gleichen Porengrößen streuen. Offensichtlich ist es bei der Herstellung nicht

gelingen, eine ganz einheitliche Porosität zu produzieren. Besonders gut ist dies bei den Proben mit $d_{por} = 1,9$ mm auf Grund der großen Anzahl der hergestellten Proben zu sehen. Dabei muss auch die Mikrostruktur, d.h. die sekundäre Porosität und die Stegdicke berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass es sehr schwierig ist, die offenzelligen metallischen Strukturen mit gleicher Porosität und gleicher Mikrostruktur herzustellen. Für die weitere Analyse der Messwerte werden Mittelwerte der Porosität und der effektiven Wärmeleitfähigkeit gebildet, wenn mehrere Proben mit gleicher Porengröße gemessen wurden. Von vielen offenzelligen Strukturen lag nur ein Paar pro Struktur ($d_{por} = 0,9; 1,3; 4,5$ mm) vor. Bei diesen Strukturen war es nicht möglich einzuschätzen, ob es eine Streuung der Wärmeleitfähigkeit gibt oder nicht. Aber wenn man die Strukturcharakterisierung analysiert, die in der Tabelle 5.8 dargestellt ist, ist zu sehen, dass die sekundäre Porosität bei diesen Strukturen in einem Bereich 0,8 – 10,8 % liegt. Daher ist zu vermuten, dass es auch eine Streuung der effektiven Wärmeleitfähigkeit gibt.

Um den Einfluss der Sensorgröße zu demonstrieren, wurden vergleichende Messungen mit Sensoren der Durchmesser 12,8 mm und 29,4 mm durchgeführt. Die Tabelle 7.2 stellt die Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Materialien in Abhängigkeit vom Sensordurchmesser dar:

Tab. 7.2: Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von offenzelligen FeCrAl-Strukturen (HO) in Abhängigkeit vom Sensordurchmesser (d_{Sensor})

d_{Sensor}	$d_{por} = 1,9$ mm $E = 88,6\%$	$d_{por} = 2,8$ mm $E = 90,6\%$	$d_{por} = 4,5$ mm $E = 91,2\%$	$d_{por} = 7,2$ mm $E = 89,8\%$
12,8 mm	0,3467	0,3178	0,2657	0,3043
29,2 mm	0,3617	0,3355	0,2902	0,3188
Anstieg des Wertes bei größerem Sensor (%)	4,2	5,2	8,4	4,5

Dabei sieht man, dass die ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit beim größeren Sensor höher liegt als beim kleineren. Dies bedeutet, dass es sehr wichtig ist, wie groß die Oberfläche der untersuchten Materialien ist, die der Sensor abdeckt. In der Tabelle 7.3 ist das Verhältnis zwischen Sensordurchmesser (d_{Sensor}) und Porendurchmesser (d_{por}) dargestellt.

Die Hersteller des TPS-Verfahrens empfehlen ein Verhältnis d_{Sensor}/d_{por} von ca. 10. Ob dieser Wert zuverlässig ist, konnte in Rahmen dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden. Dazu wären sehr große Proben und eine Palette von Sensoren verschiedener Größe erforderlich. Es ist aber zu empfehlen, wenn die Abmessungen der Probe ausreichend sind

Tab. 7.3: Verhältnis zwischen Durchmesser des Sensors und Durchmesser der Poren bei den offenzelligen FeCrAl-Strukturen (HO)

$d_{\text{Sensor}} \backslash d_{\text{por}}$	0,9 mm	1,3 mm	1,9 mm	2,8 mm	4,5 mm	7,2 mm
6,4 mm	7,1	4,9	-	-	-	-
12,8 mm	-	-	6,7	4,6	2,8	1,8
29,2 mm	-	-	15,4	10,4	6,5	4,0

für den nächst größeren Sensor, diesen dann auch zu verwenden. Für die Materialien mit den Porendurchmessern $d_{\text{por}} = 1,9; 2,8; 4,5; 7,2$ mm werden im Folgenden nur noch die Messergebnisse mit dem größeren Sensor ($d_{\text{Sensor}} = 29,2$ mm) dargestellt. Bei den Proben mit $d_{\text{por}} = 0,9; 1,3$ mm werden nur die Messergebnisse des kleinsten Sensors ($d_{\text{Sensor}} = 6,4$ mm) dargestellt, da auf Grund der geringen Probenabmessungen keine anderen Messungen möglich waren.

Die Abbildung 7.5 präsentiert die effektive Wärmeleitfähigkeit aller untersuchten offenzelligen Strukturen mit Ausnahme der Struktur aus AlMgSi_{0,5} (CM). Diese Struktur besitzt eine sehr niedrige Porosität (53 %). Die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit dieses Material beträgt 43,7 W/(m K). Bei einer gemeinsamen Darstellung aller Messwerte wäre daher die Übersichtlichkeit nicht mehr gegeben.

In der Abbildung 7.5 ist zu sehen, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit aller untersuchten offenzelligen Strukturen mit steigender Porosität ebenso wie bei den Hohlkugelstrukturen auf Grund der Verringerung des Feststoffanteils abnimmt. Außerdem ist wieder zu erkennen, dass die Porengrößen bei Raumtemperatur keinen Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit haben. Beide Tendenzen kommen auch schon in Abbildung 7.4 klar zum Ausdruck. Um alle untersuchten offenzelligen Strukturen miteinander vergleichen zu können, muss die Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials genauso wie bei den Hohlkugelstrukturen berücksichtigt werden. Dies wird ausführlicher im Kapitel 7.1.3 dargestellt.

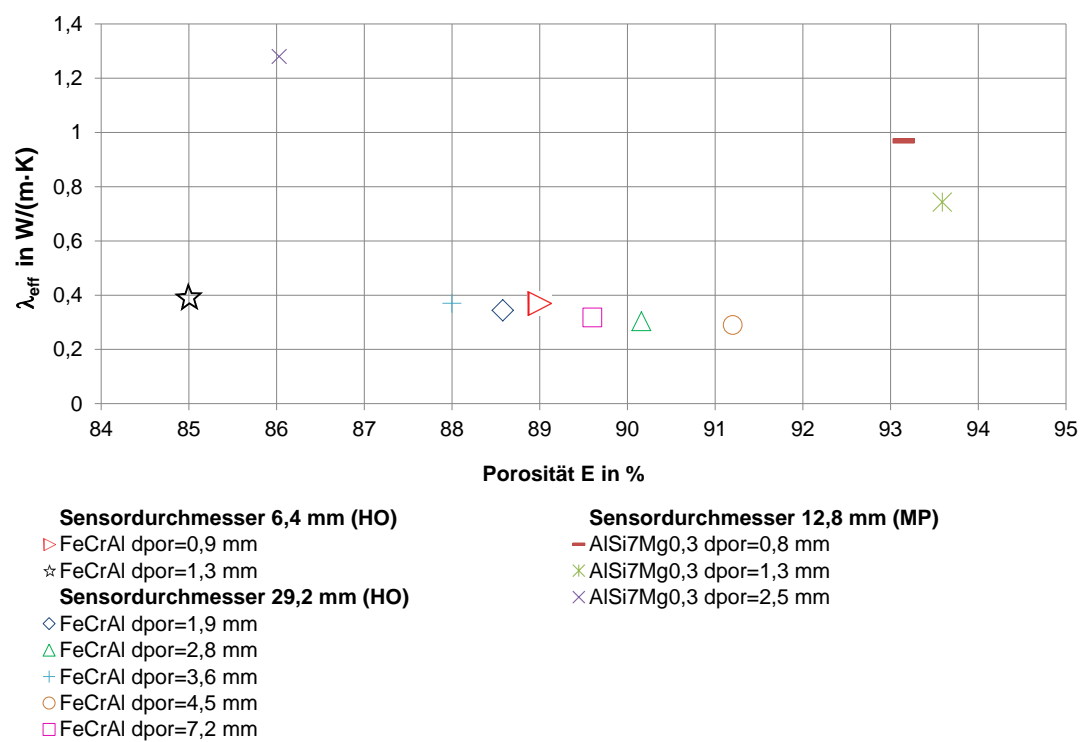


Abb. 7.5: Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) der untersuchten offenzelligen Strukturen

7.1.3 Vergleich und Diskussion der Ergebnisse für offen- und geschlossenzellige Strukturen

Für die Analyse der gewonnenen Ergebnisse bei allen untersuchten Materialien müssen die Werte der Wärmeleitfähigkeiten der Feststoffe λ_F berücksichtigt werden. Aus diesem Grund werden alle Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit der zellularen Strukturen auf die entsprechenden Werte der Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Feststoffe bezogen. Dies ist in der Abbildung 7.6 dargestellt.

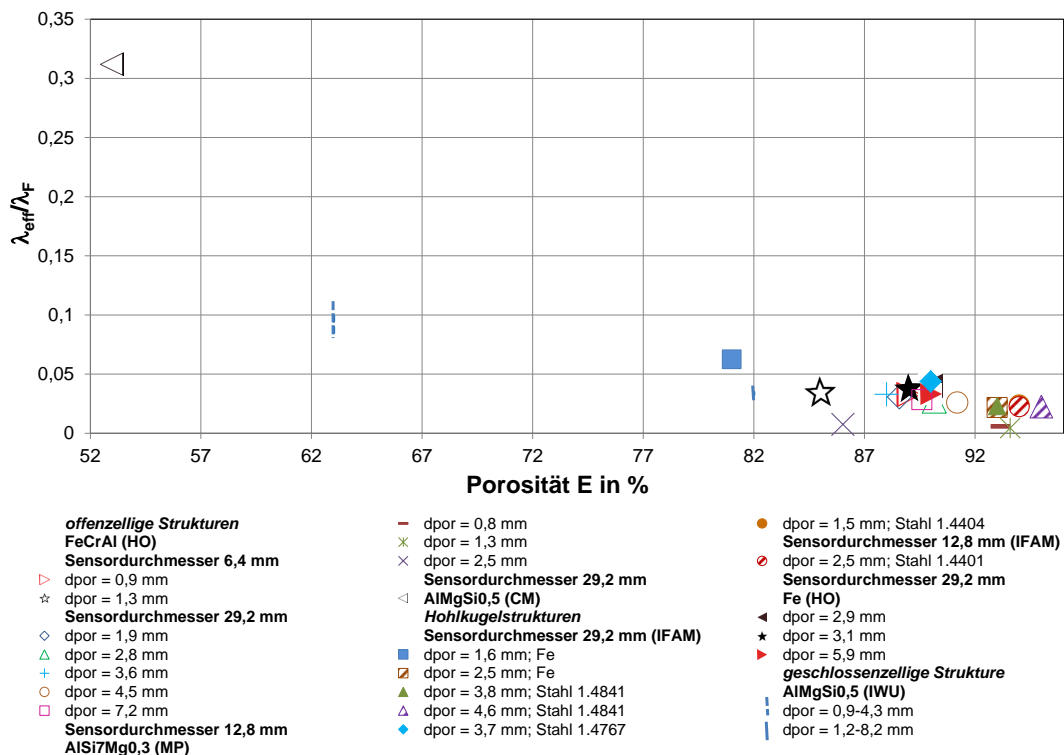


Abb. 7.6: Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes für alle untersuchten Strukturen

Wie schon im Kapitel 7.1 bei allen Materialien festgestellt wurde, nimmt die effektive Wärmeleitfähigkeit mit steigender Porosität ab. Aber außer der Porosität gibt es noch andere Einflussparameter, wie z. B. den Typ der Struktur (offenzellige oder geschlossenzellige). Aus der Literaturübersicht, die im Kapitel 4 dargestellt ist, kommen die Unterschiede zwischen geschlossenzelligen und offenzelligen Strukturen noch nicht klar zum Ausdruck. Um diese Unterschiede zu analysieren, wird speziell der Porositätsbereich 80 – 96 % in der Abbildung 7.7 gesondert dargestellt. In diesem Bereich existieren vergleichbare Ergebnisse, d. h. Messwerte für offen- und geschlossenzellige Strukturen bei annähernd gleicher Porosität. Auf Grund der definierten Strukturen werden dabei nur Hohlkugelstrukturen

und offenzellige Strukturen dargestellt.

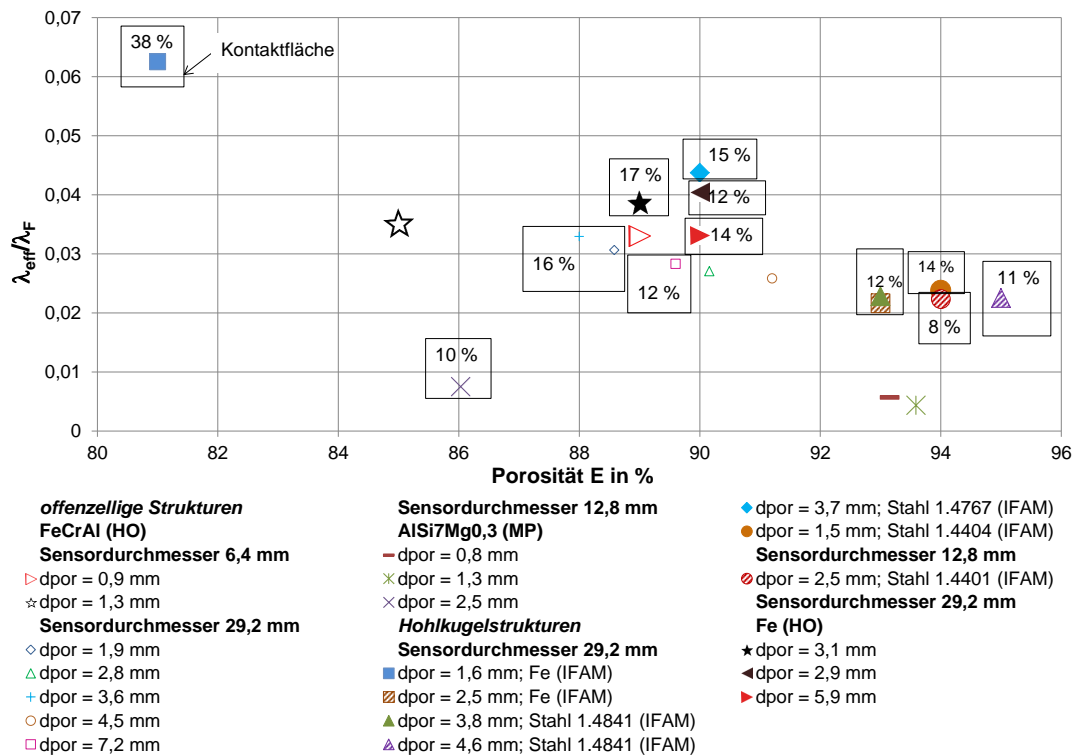


Abb. 7.7: Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes im Porositätsbereich 80 – 96 % (Hohlkugelstrukturen und offenzellige Schäume)

In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Werte der bezogenen effektiven Wärmeleitfähigkeit bei gleicher Porosität bei den Hohlkugelstrukturen (gefüllte Symbole) höher liegen als bei den offenzelligen. Um eine Erklärung dafür zu finden, wurde die Stegfläche bzw. die Kontaktfläche an ausgewählten Proben bestimmt. Wie schon im Kapitel 5 dargestellt ist, wurden diese Untersuchungen am IKTS Dresden durchgeführt. Dabei ist die Bestimmung der Kontaktfläche bei den Hohlkugelstrukturen einfacher und genauer und wurde daher bei allen Materialien analysiert. Der Aufwand und die Unsicherheit führten bei den offenzelligen Schäumen dagegen zu einer Beschränkung auf ausgewählte Strukturen. In der Abbildung 7.8 wird der Zusammenhang zwischen Porosität und Kontaktfläche dargestellt. Mit steigender Porosität nimmt die Kontaktfläche ab. Klare Unterschiede zwischen offenzelligen und geschlossenzelligen Strukturen sind nicht zu erkennen, vor allem da auch die Messunsicherheit dieser Analyse (ca. 5 %) berücksichtigt werden muss.

Alle in der Abbildung 7.7 dargestellten Messergebnisse der bezogenen effektiven Wärmeleitfähigkeit liegen im Bereich zwischen $\lambda_{eff}/\lambda_F = 0,02 - 0,05$ mit Ausnahme der Werte der offenzelligen Strukturen aus AlSiMg0,3 (MP), die um deutlich niedriger liegen. Die Struktur mit $d_{por} = 2,5$ mm besitzt nach Abbildung 7.8 mit nur 10 % eine geringere

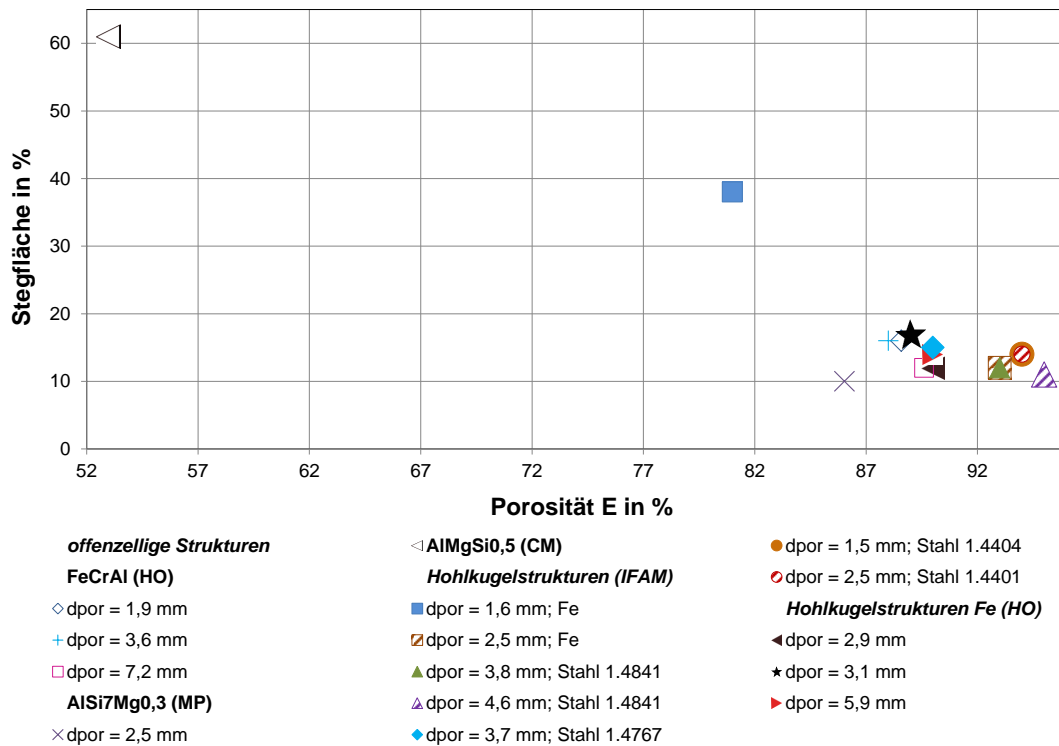


Abb. 7.8: Stegfläche ausgewählter Strukturen in Abhängigkeit von der Porosität

Kontaktfläche als nach Porosität zu erwarten wäre. Die Kontaktfläche der beiden anderen Strukturen ($d_{por} = 0,8 \text{ mm}$ und $d_{por} = 1,3 \text{ mm}$) konnte nicht ermittelt werden, jedoch ist ein ähnliches Verhalten zu erwarten. Kontaktierungsprobleme könnten daher die Ursache für die geringen Messwerte bei AlSiMg0,3 (MP) sein. Eine weitere mögliche Ursache dafür ist die geringe Probengröße, die nicht zuließ, mit einem größeren Sensor zu messen. Außerdem sind diese Strukturen aus sehr gut leitendem Material ($\lambda_F = 170 \text{ W/(m K)}$) hergestellt. Bei dem kleineren Sensor war es damit nicht möglich, den notwendigen Temperaturanstieg im Sensor zu erreichen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kontaktfläche allein nicht zur Begründung der Unterschiede zwischen offenzelligen und geschlossenzelligen Strukturen ausreicht. Dies führt zu der Vermutung, dass die Feststoffverteilung in der Struktur eine größere Rolle spielt. Speziell für die Hohlkugelstrukturen und die offenzelligen Strukturen wurden, wie schon im Kapitel 5 präsentiert, Aufnahmen mit einem Lichtmikroskop gemacht. Die Abbildung 7.9 präsentiert Beispiele dieser Untersuchungen.

Dabei hat die Hohlkugelstruktur sehr gleichmäßige und flächige Kontakte zwischen den Kugeln und die Kugeln selbst besitzen eine gleichmäßige Dicke der Wände. Dagegen zeigt die offenzellige Struktur die Verbindungen der Stege in Form von Knoten, die im Inneren

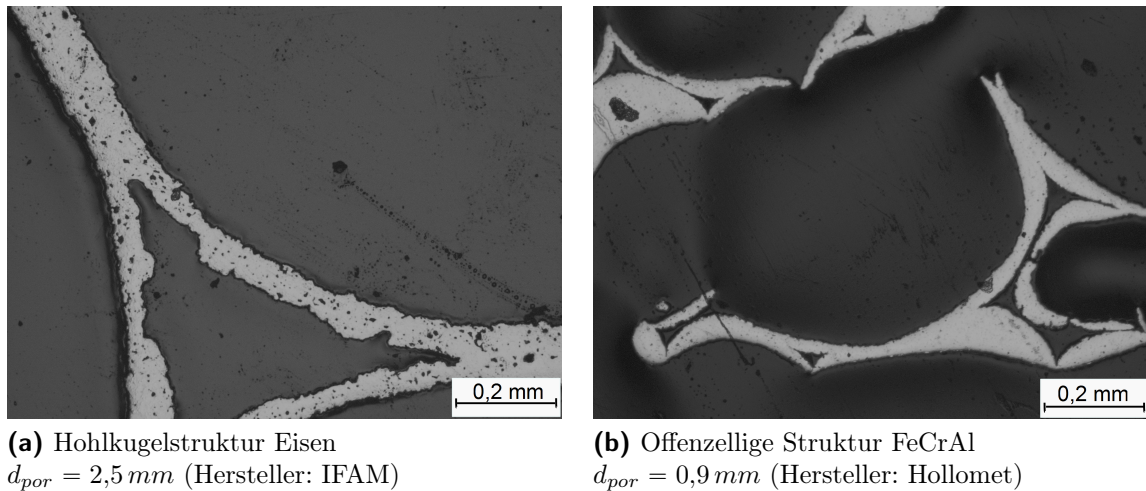


Abb. 7.9: Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop

selbst Hohlräume haben. Weiterhin gibt es teilweise in der Mitte sehr dünne Stege, so dass ein höherer Wärmetransportwiderstand entsteht und sich damit die effektive Wärmeleitfähigkeit verringert.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass weitere Untersuchungen zur Analyse der Struktur im Inneren, z. B. durch Computer-Tomographie notwendig sind, um diese Hypothese zu bestätigen. Die Aufnahmen, die in der Abbildung 7.9 dargestellt sind, wurden nur auf den Oberflächen der untersuchten Materialien aufgenommen. Außerdem besteht der Bedarf, den Porositätsbereich insbesondere der offenzelligen Strukturen in zukünftigen Untersuchungen zu erweitern, um genau die Unterschiede zwischen offenzelligen und geschlossenzelligen Strukturen nachzuvollziehen. Dies war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da keine entsprechenden Proben zu beschaffen waren.

7.2 Messungen bei höheren Temperaturen

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei höheren Temperaturen dargestellt. Nahezu alle untersuchten Materialien wurden mit dem instationären TPS-Verfahren bis zur maximalen Temperatur von 250 °C gemessen, jedoch mit einigen Ausnahmen. Die Hohlkugelstrukturen aus Eisen (HO) konnten aufgrund der zu großen Poren nicht gemessen werden, die aufgeschäumten Strukturen (IWU) wegen ihrer zu großen Unregelmäßigkeit und die offenzelligen Strukturen aus AlSi7Mg0,3 (MP) und AlMgSi0,5 (CM) wegen ihrer zu hohen Wärmeleitfähigkeit. Der größte Sensor, der für solche Untersuchungen zur Verfügung stand, hat einen Durchmesser von 12,8 mm. Damit war es nicht möglich, eine repräsentative Oberfläche bei großem Porendurchmesser abzudecken und die notwendige höhere Heizleistung bei der Durchführung von Messungen bei Materialien mit höherer Wärmeleitfähigkeit zu realisieren.

Mit der stationären Messmethode PMA2, die im Kapitel 6.1 beschrieben ist, wurden ausgewählte Strukturen, die von den Herstellern in der benötigten Größe geliefert werden konnten, untersucht. Diese Messungen wurden bis ca. 900 °C durchgeführt. Zusätzlich wurde für zwei offenzellige Strukturen mit den kleinsten Porendurchmessern ($d_{por} = 0,9; 1,3$ mm) die instationäre Messmethode LFA, die im Kapitel 6.2.2 beschrieben ist, eingesetzt. Diese Untersuchungen, die jedoch zunächst die Temperaturleitfähigkeit ergeben, wurden bis zu einer maximalen Temperatur von ca. 700 °C durchgeführt.

7.2.1 Hohlkugelstrukturen

Wie schon oben erwähnt, wurden alle Hohlkugelstrukturen (IFAM) außer den Strukturen aus Eisen mit den Porositäten 81 % und 93 %, mit dem TPS-Verfahren bis 250 °C untersucht. Die Messergebnisse sind in der Abbildung 7.10 dargestellt.

Darin sind zusätzlich die Wärmeleitfähigkeiten der Grundmaterialien bei Raumtemperatur (λ_F) und die Porositäten der untersuchten Materialien eingetragen. Es ist wieder zu erkennen, dass die Porosität einen direkten Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit hat. Die Wärmeleitfähigkeitswerte sind so verteilt, dass die niedrigsten Werte bei der maximalen Porosität $E = 95$ % erreicht werden und bei der geringsten Porosität ($E = 90$ %) die Werte am höchsten liegen. Dass die Messwerte bei $E = 90$ % bei auffallend hohen Werten liegen, kann nicht allein durch die Porosität begründet werden. Vermutlich ist bei dieser Struktur eine gute Kontaktierung zwischen den Kugeln durch besseres Sintern vorhanden.

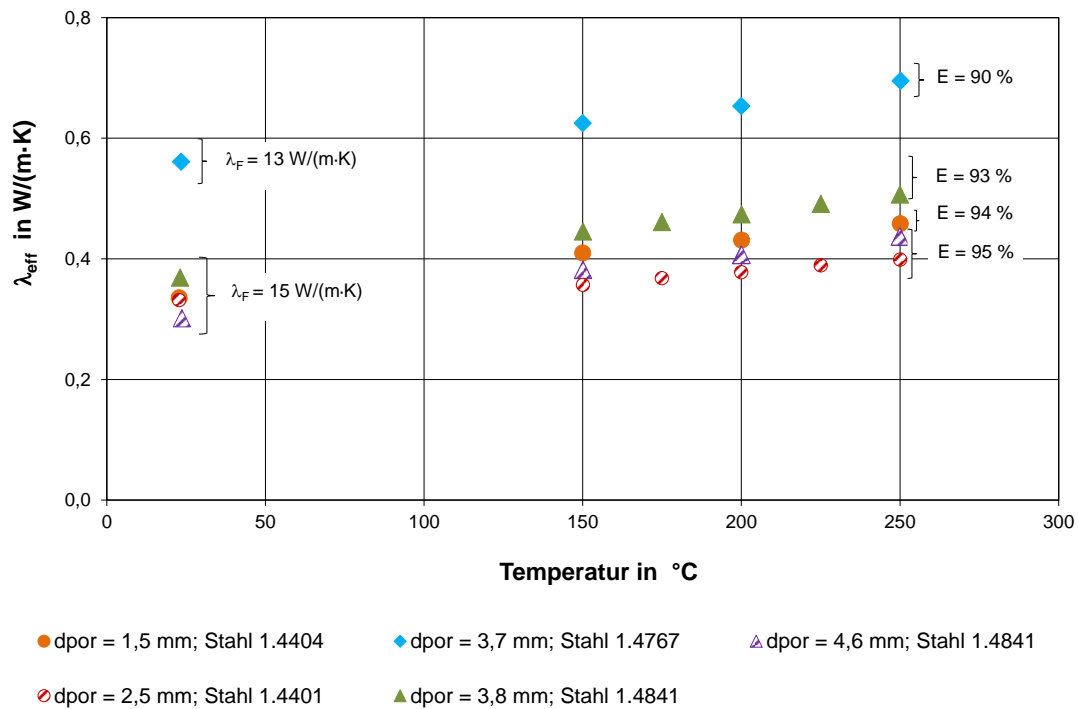


Abb. 7.10: Effektive Wärmeleitfähigkeit der Hohlkugelstrukturen (IFAM) in Abhängigkeit von der Temperatur, (TPS, Kapton-Sensor mit Durchmesser 12,8 mm)

Außerdem ist zu erkennen, dass es im Temperaturbereich bis 250 °C keinen Porengrößeneinfluss gibt. Diese Aussage stützt sich zum Beispiel auf die Betrachtung der Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 mit dem größeren Porendurchmesser $d_{\text{por}} = 4,6$ mm. Die effektiven Wärmeleitfähigkeitswerte dieser Struktur liegen unabhängig vom Porendurchmesser zusammen mit allen anderen für Hohlkugelstrukturen gleicher Porosität $E = 95\%$. Bei der Betrachtung der Gesamtheit aller Messwerte in der Abbildung 7.10 erkennt man eine Steigerung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur um ca. 10–20 %. Dies ist durch den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials und des Gases in den Poren und den Strahlungsbeitrag zu erklären.

Die Messungen mit der Plattenapparatur PMA2 wurden mit der Struktur aus Stahl 1.4841 mit dem Porendurchmesser $d_{\text{por}} = 4,6$ mm durchgeführt. Die Messergebnisse der PMA2 und die Ergebnisse des TPS-Messverfahrens aus der Abbildung 7.10 sind zusammen in der Abbildung 7.11 dargestellt.

Dabei ist eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse der PMA2 mit denjenigen des TPS-Messverfahrens zu erkennen. Außerdem zeigt sich auch beim Plattenverfahren die erwähnte Steigerung der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur. Der

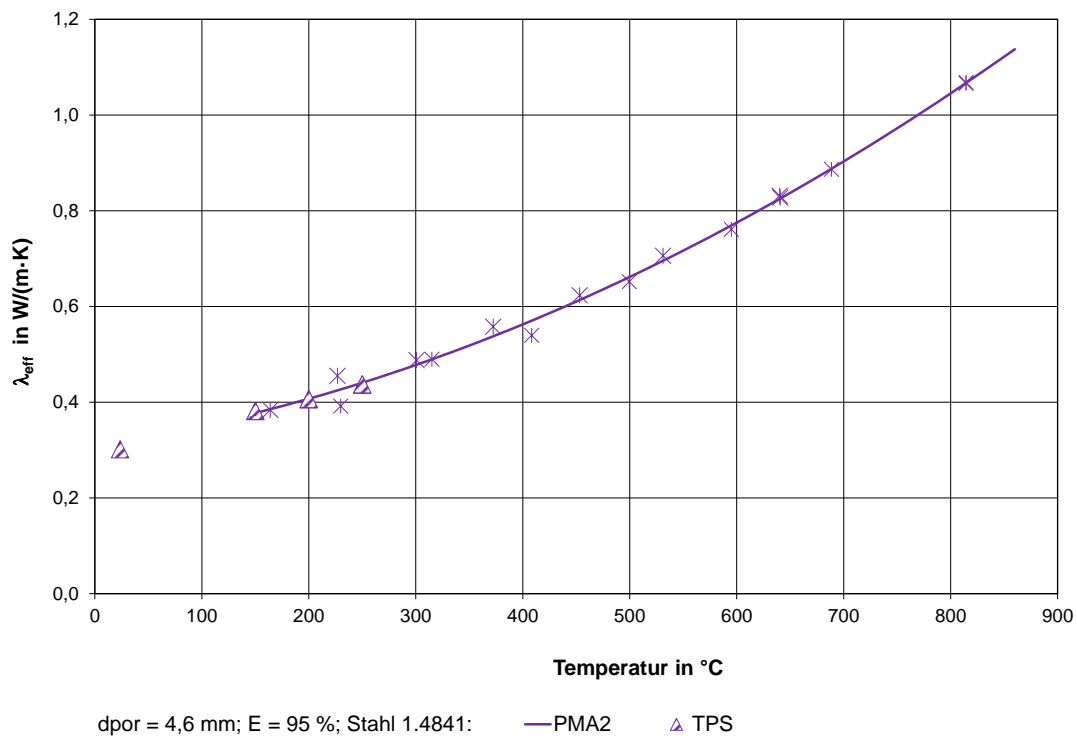


Abb. 7.11: Effektive Wärmeleitfähigkeit der Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 mit $d_{por} = 4,6 \text{ mm}$ (IFAM) in Abhängigkeit von der Temperatur (TPS, PMA2)

Grund dafür ist speziell bei den höheren Temperaturen der zunehmende Strahlungseinfluss, was man an der progressiven Steigung erkennt.

Die Hohlkugelstrukturen aus Eisen wurden aus bereits genannten Gründen nicht bei höheren Temperaturen untersucht. Abseits davon wurde dennoch eine Eisen-Struktur ($E = 93 \text{ \%}$, $d_{por} = 2,5 \text{ mm}$) bis 800°C mit der PMA2 gemessen. Die Messergebnisse sind in der Abbildung 7.12 dargestellt.

Dabei ist zu sehen, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit, ausgehend von einem durch TPS bestätigten Wert von ungefähr $1,55 \text{ W/(m K)}$ bei der ersten Messung in der PMA2 während der Aufheizung stark abnimmt und bei der Abkühlung auf dem erreichten niedrigen Niveau bleibt. Bei der zweiten Messung sind keine Unterschiede zwischen Aufheizung und Abkühlung mehr zu verzeichnen. Nach dem Ausbau der Probe aus der PMA2 wurde eine Materialänderung festgestellt. Die Struktur hat sich in der Farbe verändert und ist oxidiert. Auf Grund der Oxidbildung ist die effektive Wärmeleitfähigkeit um ca. 70 \% gesunken. Um diese Materialänderungen zu bestätigen, wurden bereits mit dem TPS-Verfahren bei Raumtemperatur untersuchte Materialien im Ofen in Luftatmosphäre bei 700°C und bei 900°C getempert. Danach wurden diese Strukturen mit dem TPS-Verfahren (Sensordurchmesser $12,8 \text{ mm}$) erneut bei Raumtemperatur gemessen. Die Messergebnisse

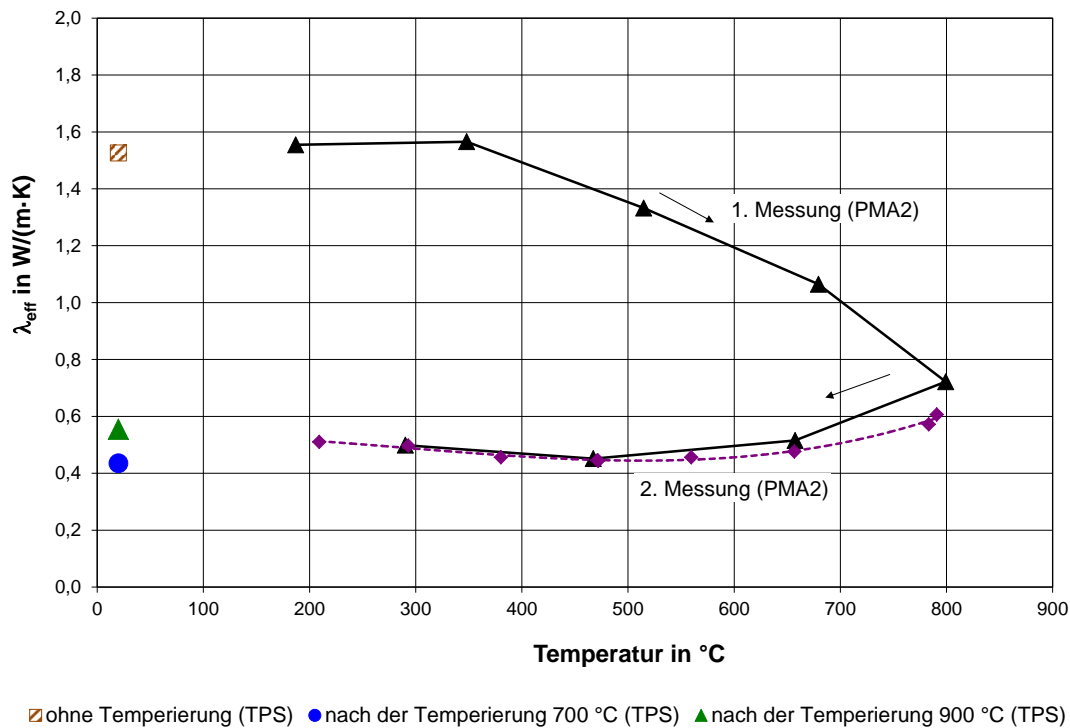


Abb. 7.12: Effektive Wärmeleitfähigkeit der Hohlkugelstruktur aus Eisen mit $E = 93\%$ und $d_{\text{por}} = 2,5 \text{ mm}$ (IFAM) in Abhängigkeit von der Temperatur (TPS, PMA2)

der TPS-Methode bestätigen die Ergebnisse des Plattenverfahrens. Dies bedeutet, dass die möglichen Veränderungen der Eigenschaften und des Zustandes des Grundmaterials unter Temperaturbelastung unbedingt zu berücksichtigen sind.

7.2.2 Offenzellige Strukturen

Wie schon erwähnt, wurden alle offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) mit dem TPS-Messverfahren im Temperaturbereich $150\text{--}250^{\circ}\text{C}$ untersucht. Auf Grund der Porengrößen wurden zwei Kapton-Sensoren mit den Durchmessern $6,4 \text{ mm}$ und $12,8 \text{ mm}$ angewendet. Die Abbildung 7.13 präsentiert diese Messergebnisse.

In der Abbildung sind die Porositäten der untersuchten Materialien mit angegeben.

Unabhängig vom Porendurchmesser steigt bei allen Proben die effektive Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur. Ursache ist der Anstieg der Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials (FeCrAl, siehe Kapitel 5.3), der Luft und der zunehmende Strahlungseinfluss. Die höchsten Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit liefert das Material mit der niedrigsten Porosität $E = 85\%$. Ein Stück tiefer liegen die Messergebnisse der Materialien

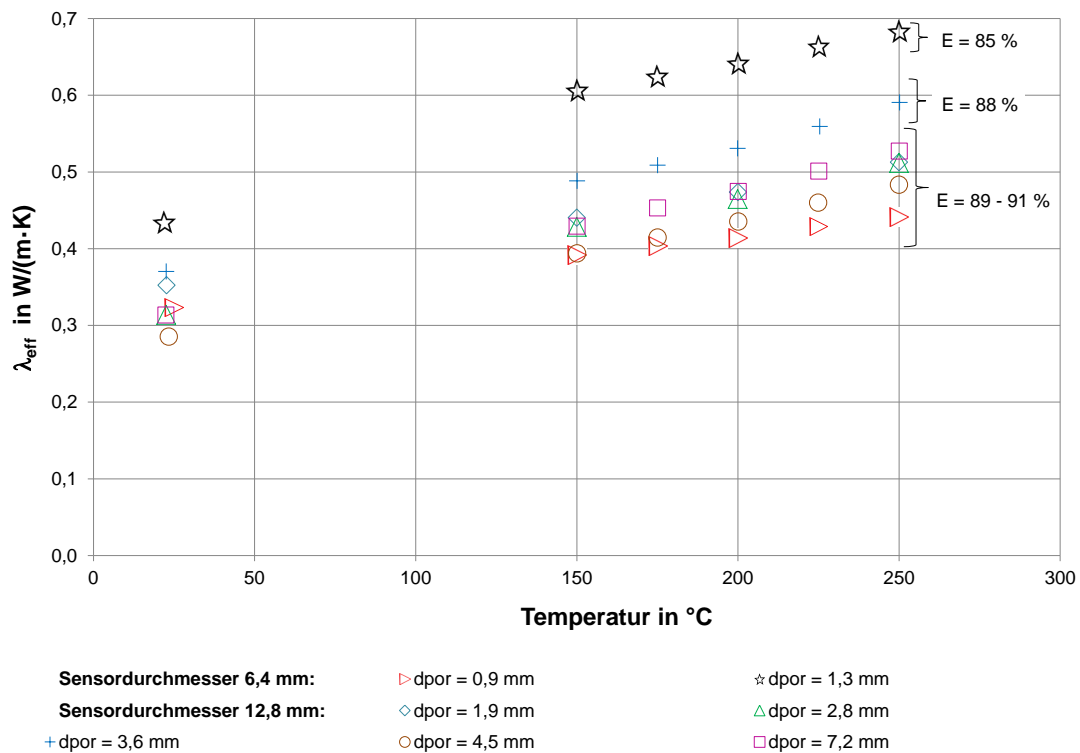


Abb. 7.13: Effektive Wärmeleitfähigkeit der offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) in Abhängigkeit von der Temperatur (TPS)

mit Porositäten im Bereich 89 – 91 %. Damit ist der direkte Einfluss der Porosität, ebenso wie bei den Untersuchungen bei Raumtemperatur zu erkennen. Dagegen ist ein Porengrößeneinfluss auch in diesem Temperaturbereich nicht feststellbar. Die Messergebnisse der Materialien nahezu gleicher Porosität mit den Porengrößen $d_{\text{por}} = 1,9; 2,8; 7,2 \text{ mm}$ liegen z. B. alle auf gleichem Niveau, unabhängig von der Porengröße. Um zusätzlich zu untersuchen, wann die Veränderung des Porendurchmessers einen Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit hat, wurden zwei Materialien mit den Porendurchmessern $d_{\text{por}} = 1,9 \text{ mm}$ und $d_{\text{por}} = 2,8 \text{ mm}$ mit der PMA2 bis zu Temperaturen von ca. 820°C gemessen. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 7.14 zusammen mit den zugehörigen Ergebnissen der TPS-Messmethode dargestellt.

Die Messergebnisse der PMA2 zeigen im Temperaturbereich $150 - 250^{\circ}\text{C}$ eine gute Übereinstimmung mit den TPS-Messergebnissen und bestätigen, dass es dort keinen Porengrößeneinfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit gibt. Bei der Analyse des Temperaturbereiches $400 - 820^{\circ}\text{C}$ liegen die Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit des Materials mit $d_{\text{por}} = 2,8 \text{ mm}$ zunehmend höher als die des Materials mit $d_{\text{por}} = 1,9 \text{ mm}$. Dabei beträgt dieser Unterschied bei 400°C ca. 7 % und der maximale Unterschied von ca. 20 % ist bei der Temperatur von 820°C zu sehen. Kleine Poren behindern den Strahlungstransport durch

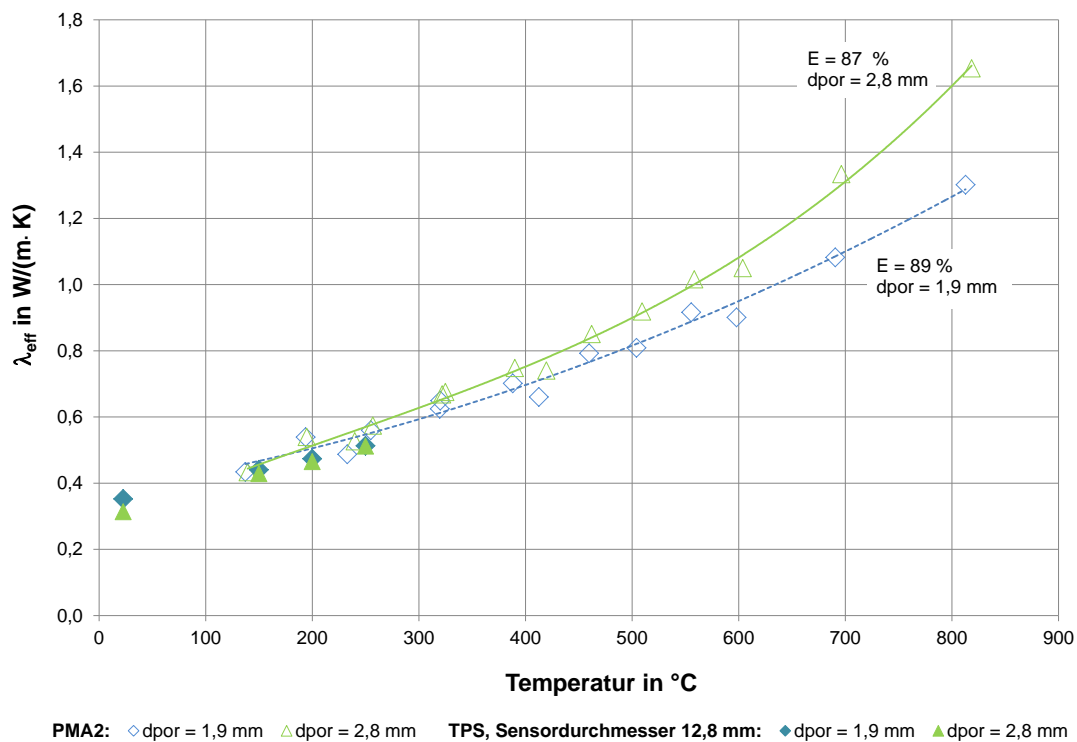


Abb. 7.14: Effektive Wärmeleitfähigkeit offenzelliger Strukturen aus FeCrAl (HO) in Abhängigkeit von der Temperatur (TPS, PMA2)

ihre Wirkung als Strahlungsschutzschirm. Dabei ist die Anzahl der Strahlungsschutzschir-
men bei kleineren Poren größer, als bei größeren Poren. Dies führt zu geringeren Werten
der effektiven Wärmeleitfähigkeit.

Die offenzellige Struktur aus AlSi7Mg0,3 (MP) wurde ebenfalls mit der PMA2 untersucht.
Dabei sind gravierende Probleme aufgetreten, so dass die Messergebnisse verworfen werden
mussten. Die detaillierte Beschreibung dieser Probleme ist im Kapitel 6.3 zu finden.

Zusammenfassend ist es derzeit noch nicht möglich, die geschlossenzelligen und offenzel-
ligen Strukturen miteinander auch bei höheren Temperaturen zu vergleichen. Es konnten
bisher zu wenige Untersuchungen durchgeführt werden, um eine Aussage zu treffen.

Tab. 7.4: Wiederholpräzision (WP) der TPS-Messmethode bei Raumtemperatur

Sensordurchmesser (mm)	12,8			29,2		
Material	FeCrAl			Stahl		
				1.4767	1.4841	1.4404
d_{por} (mm)	1,9	2,8	7,2	3,7	4,6	1,5
WP (%)	3,5	2,4	1,2	0,4	2,7	3,1

7.3 Wiederholpräzision und Messunsicherheit

Für die vorliegende Arbeit wurden drei Messapparaturen eingesetzt. Für die Bewertung der gewonnenen Messergebnisse ist es wichtig zu analysieren, wie groß die Wiederholpräzision und die Messunsicherheit sind. Die eingesetzten Messverfahren haben verschiedene Messprinzipien und werden aus diesem Grund separat betrachtet.

7.3.1 TPS-Messverfahren

Die Wiederholpräzision beim TPS-Messverfahren wurde durch mehrfachen Ausbau und Wiedereinbau des Sensors mit anschließender Versuchsdurchführung bei Raumtemperatur bestimmt. Die Messungen wurden für jedes Material mit gleichen Parametern (Heizleistung und Messdauer) durchgeführt und dabei der Sensor möglichst auf die gleiche Stelle der Probe gelegt, um den Einfluss der Unregelmäßigkeiten der Materialien selbst zu vermeiden. Diese Analyse wurde bei drei ausgewählten Hohlkugelstrukturen (IFAM) und drei ausgewählten offenzelligen Strukturen (HO) durchgeführt. Diese Strukturen wurden auf Grund ihrer relativ guten Homogenität im Vergleich mit den anderen untersuchten Materialien für die Analyse ausgewählt. Dabei wurden die zwei am häufigsten verwendeten Sensordurchmesser eingesetzt. Die Tabelle 7.4 präsentiert diese Untersuchungen.

Dabei liegt die Wiederholpräzision unabhängig von der Struktur und dem Sensordurchmesser im Rahmen der Messunsicherheit von 5 %. Die Bestimmung der Wiederholpräzision bei höheren Temperaturen war auf Grund des enormen Zeitaufwandes und der Alterung der Sensoren bei zusätzlichen Messungen nicht möglich.

Die Messunsicherheit von 5 % für das TPS-Verfahren ist eine Angabe des Herstellers, die nach dessen Aussage auf vergleichenden Messungen mit anderen Verfahren an Standardproben beruht. Bei einer ähnlichen Messmethode (Transient Hot Strip (THP)) präsentieren *Hammerschmidt und Sabuga* [35] eine Bestimmung der Messunsicherheit nach ISO,

Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM ISO, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [41]). Wie beim TPS-Verfahren wird ein mathematisches Modell für die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit eingesetzt. Dabei wird jedoch eine Linearisierung dieses mathematischen Modells vorgenommen und damit auch die Bestimmung der Messunsicherheit möglich. Solch eine Linearisierung ist beim TPS-Messverfahren auf Grund der komplexen mathematischen Abhängigkeiten nicht realisierbar und damit der GUM-Standard nicht anwendbar. Es ist zur Zeit nicht möglich, bei der TPS-Methode die Messunsicherheit zu bestimmen. Zusätzlich zur Messunsicherheit, welche die zufälligen Fehler bei der Auswertung der Messungen bewertet, gehören die Kontaktierung des Sensors mit den Oberflächen der Proben, die Positionierung des Sensors, die Inhomogenität der untersuchten Materialien und die Alterung der Sensoren zu den Größen, die die Messergebnisse beeinflussen. Bei den untersuchten Proben beeinflussen diese Faktoren den Messfehler mindestens in gleicher Größenordnung wie die Messunsicherheit.

7.3.2 Laser-Flash-Messverfahren

Die nächste instationäre Messmethode ist das Laser-Flash-Verfahren. Dabei wurde die Wiederholpräzision nach einem ähnlichen Herangehen wie beim TPS Verfahren bei Raumtemperatur bei der Messung der Temperaturleitfähigkeit bestimmt. Die Proben der zwei mit der Laser-Flash-Methode untersuchten Materialien wurden dreimal mit dem Laserimpuls beschossen, danach wurde wieder komplett ausgebaut und dann wieder eingebaut. Dies wurde fünfmal wiederholt. Die Wiederholpräzision ist in der Tabelle 7.5 präsentiert.

Tab. 7.5: Wiederholpräzision (WP) der LFA bei den offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) bei Raumtemperatur

d_{por} (mm)	0,9	1,3
WP (%)	1,0	2,0

Dabei liegt die Wiederholpräzision der Laser-Flash-Methode, genau wie beim TPS-Verfahren, im Rahmen der Messunsicherheit von 5 % (Herstellerangaben). Die Bestimmung der Wiederholpräzision wurde bei höheren Temperaturen auf Grund des Zeitaufwandes und der Zerstörung der speziellen Beschichtung der Probenoberflächen bei höheren Temperaturen nicht durchgeführt. Die Messunsicherheit bei der Laser-Flash-Methode ist ebenso wie beim TPS-Verfahren zurzeit nicht selbst zu bestimmen.

7.3.3 Plattenverfahren PMA2

Bei dem stationären Plattenverfahren PMA2 wurde die Wiederholpräzision auf Grund des Aufwandes im Messaufbau nicht bestimmt. Das Einkleben der Thermoelemente müsste bei jedem Einbau neu erfolgen, was sowohl für die Probe als auch für die Thermoelemente ungünstig wäre. Weiterhin wäre damit ein enormer Zeitaufwand verbunden, da die Messung bei Ofentemperatur von 300 °C beginnen und immer eine Abkühlungsphase notwendig gewesen wäre. Aber im Gegensatz zu den eingesetzten instationären Methoden ist die PMA2 die einzige Messmethode, bei der die Messunsicherheit nach GUM ISO, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [41] bestimmt werden kann. Die Bestimmung der Messunsicherheit berücksichtigt die Anteile aus der Wärmestrommessung, die Messunsicherheit der eingesetzten Thermoelemente und die der Schichtdickenmessung. Die Messunsicherheit beträgt bei Dämmstoffen, für die diese Apparatur ausgelegt ist, im Allgemeinen maximal 3 % – 5 %. Bei den gemessenen zellularen Strukturen ist sie teilweise deutlich höher. Dafür gibt es zwei Ursachen. Durch die schwierige Kontaktierung der Thermoelemente gibt es bei einigen Messungen größere Unterschiede in den Anzeigewerten auf einer Messebene. Je höher die Wärmeleitfähigkeit der Struktur ist, um so geringer ist die Temperaturdifferenz über die Probe und um so stärker fallen diese unterschiedlichen Anzeigewerte ins Gewicht. Die Messunsicherheit wird daher bei diesen Strukturen von der Temperaturmessung dominiert und ist bei gut leitenden Strukturen und niedrigen Ofentemperaturen besonders hoch.

Die Messergebnisse der PMA2 bei höheren Temperaturen, die im Kapitel 7.2 dargestellt werden, sind in diesem Teil der Arbeit mit den Fehlerangaben präsentiert. Bei den geschlossenzelligen Materialien wurden zwei Hohlkugelstrukturen untersucht. Die erste Hohlkugelstruktur besteht aus Stahl 1.4841 ($E = 95\%$, $d_{por} = 4,6$ mm, IFAM) und die zweite aus Eisen ($E = 93\%$, $d_{por} = 2,5$ mm, IFAM). Die Abbildung 7.15 präsentiert die Messergebnisse dieser Strukturen mit Angabe der Messunsicherheit.

Dabei liegt die Messunsicherheit bei der Hohlkugelstruktur aus Stahl im Bereich 4,5 % – 7,2 %. Bei dem zweiten Material aus Eisen ist die Messunsicherheit zum Teil größer und beträgt 3 % – 21 %.

Bei den offenzelligen Strukturen aus FeCrAl ($d_{por} = 1,9$ mm und $d_{por} = 2,8$ mm, HO) werden die Messergebnisse in der Abbildung 7.16 zusammengestellt und dazu die Messunsicherheit angegeben.

Die Messunsicherheit beträgt 3 % – 11 %.

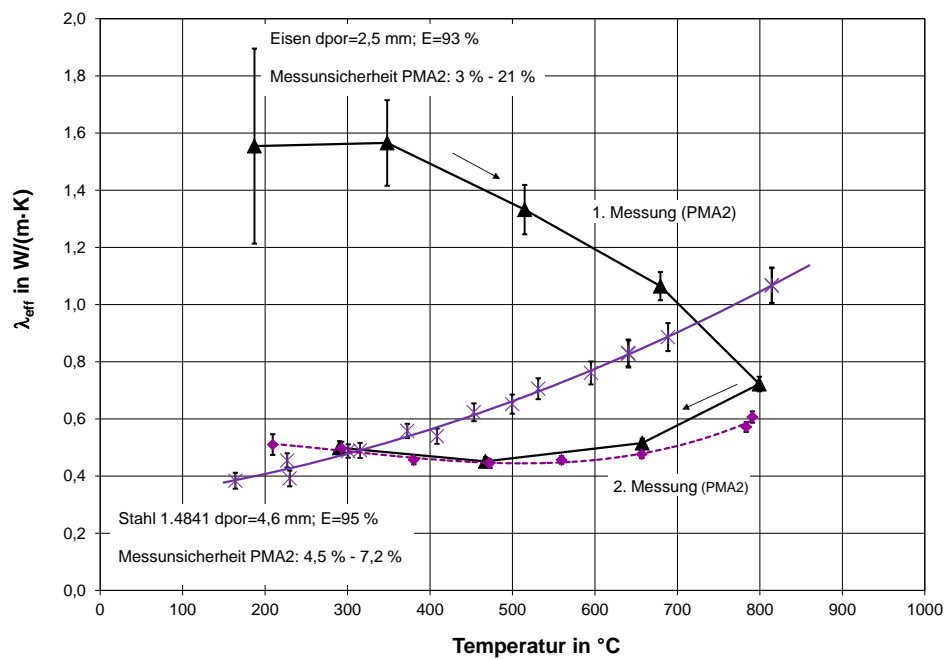


Abb. 7.15: Messergebnisse der PMA2 für die Hohlkugelstrukturen aus Stahl 1.4841 ($E = 95 \%$, $d_{\text{por}} = 4,6 \text{ mm}$, IFAM) und Eisen ($E = 93 \%$, $d_{\text{por}} = 2,5 \text{ mm}$, IFAM) mit Angabe der Messunsicherheit

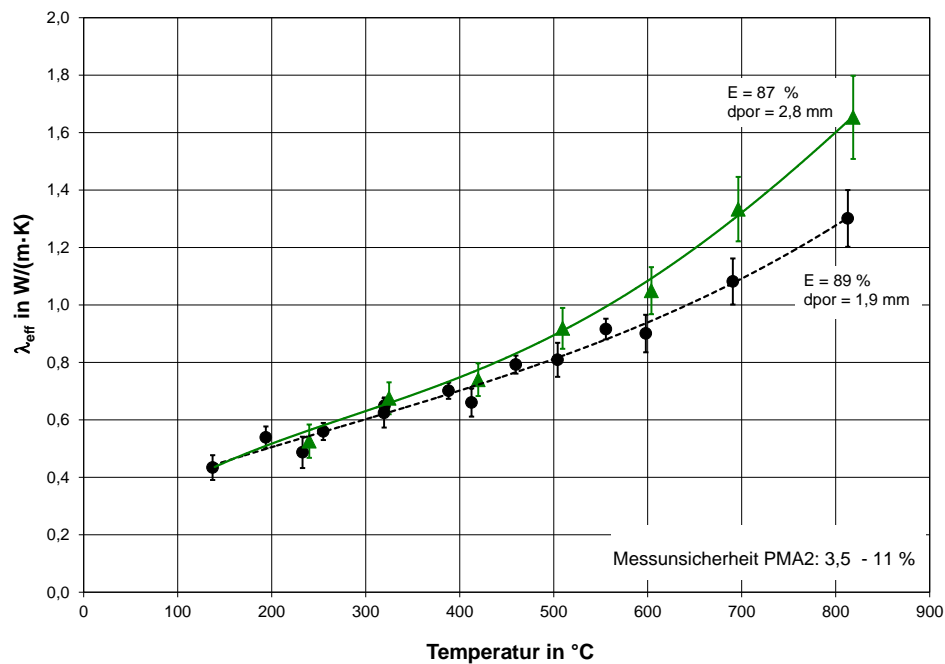


Abb. 7.16: Messergebnisse der PMA2 für die offenzellige FeCrAl-Struktur ($d_{\text{por}} = 1,9 \text{ mm}$; $d_{\text{por}} = 2,8 \text{ mm}$, HO) mit Angabe der Messunsicherheit

7.4 Vergleich mit Literaturwerten und mathematischen Modellen

Die gemessenen Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit werden in diesem Kapitel mit Literaturwerten verglichen, um die gewonnenen Messergebnisse zu bewerten. Für die Analyse werden die offenzelligen FeCrAl-Strukturen (HO) und die Hohlkugelstrukturen (IFAM) auf Grund der zahlreichen Proben und der homogenen Struktur verwendet. Außerdem werden die in der Literatur vorhandenen mathematischen Modelle für ausgewählte Strukturen unter Berücksichtigung ihrer Strukturparameter und der Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials angewendet. Diese Analyse wird bei den relativ regulären Hohlkugelstrukturen aus Stählen (IFAM) durchgeführt. Diese Stähle haben alle eine ähnliche Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes ($13 - 15 \text{ W}/(\text{m K})$) aber unterschiedliche Porositäten. Weiterhin wurden Modellrechnungen für die offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) durchgeführt. Die Betrachtung beschränkt sich auf Raumtemperatur.

7.4.1 Vergleich mit den Literaturwerten

Um die eigenen Messergebnisse mit den Literaturwerten vergleichen zu können, wird die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials bezogen.

Die Abbildung 7.17 zeigt die bezogene effektive Wärmeleitfähigkeit der geschlossenzelligen Hohlkugelstrukturen (IFAM) im Vergleich mit den Literaturwerten.

Die eigenen Messungen verlängern gewissermaßen die Messergebnisse von *Solorzano u. a.* [70] mit Ausnahme der Strukturen aus Eisen, die in diesem Vergleich etwas niedriger liegen. Die Ursache dafür könnte ein Strukturunterschied zwischen den Schäumen sein. Bei *Solorzano u. a.* [70] wurden sehr irreguläre Strukturen mit verschiedenen Porengrößen und unterschiedlichen Wandstärken der Poren untersucht. Die von *Tzeng und Ma* [79] vorgestellten Messergebnisse, die mit einer Plattenmethode (Heat-Flow-Meter-Apparatur) gewonnen wurden, liegen deutlich unter den Messergebnissen von *Solorzano u. a.* [70] und den eigenen Werten. Die Ursache dafür liegt wahrscheinlich in Kontaktierungsproblemen beim Plattenverfahren. Eine Gemeinsamkeit aller Messergebnisse ist jedoch, dass die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Porosität abnimmt. Zusätzlich enthält die Abbildung den oberen Grenzwert der effektiven Wärmeleitfähigkeit aus der Parallelschaltung nach dem Modell von *Wiener* [85]. Alle Messergebnisse sind unterhalb dieser Linie zu finden.

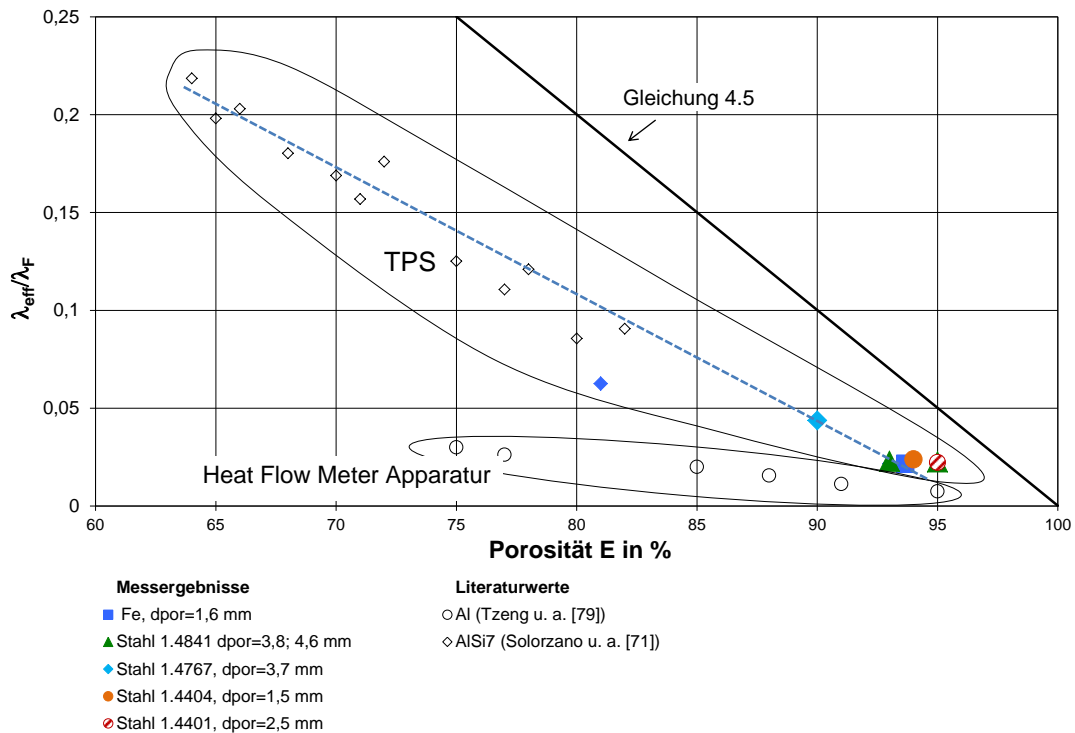


Abb. 7.17: Bezogene effektive Wärmeleitfähigkeit der geschlossenzelligen Hohlkugelstrukturen (IFAM) im Vergleich mit Literaturwerten

Die Abbildung 7.18 präsentiert die offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) im Vergleich mit den Literaturwerten. Wie bei den geschlossenzelligen Strukturen wird die effektive Wärmeleitfähigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials bezogen. Die eigenen Messergebnisse zeigen einen gleichen Verlauf wie die Werte von *Fend u. a. [25]*, *Coquard u. a. [21]* und *Coquard und Baillis [20]* und ergänzen die bisherigen Messungen insbesondere im Porositätsbereich 85 – 93 %. Eine gewisse Streuung der effektiven Wärmeleitfähigkeit ist sehr typisch für solche Strukturen. Nur die Werte des Guarded-Hot-Plate Messverfahrens liegen um einiges höher. Dafür gibt es zur Zeit keine Erklärung. Die effektive Wärmeleitfähigkeit nimmt mit steigender Porosität ab, genauso wie bei den geschlossenzelligen Strukturen. Alle Messergebnisse liegen unterhalb der Linie nach Gleichung 4.5.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit bei allen zellularen metallischen Strukturen bei Raumtemperatur mit steigender Porosität abnimmt. Die Porengröße hat dabei keinen Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit, weder bei den geschlossenzelligen, noch bei den offenzelligen Strukturen, solange die Temperatur 250 °C nicht überschreitet. Die Analyse bestätigt, dass die Messergebnisse von den Besonderheiten der Strukturen stark abhängig sind.

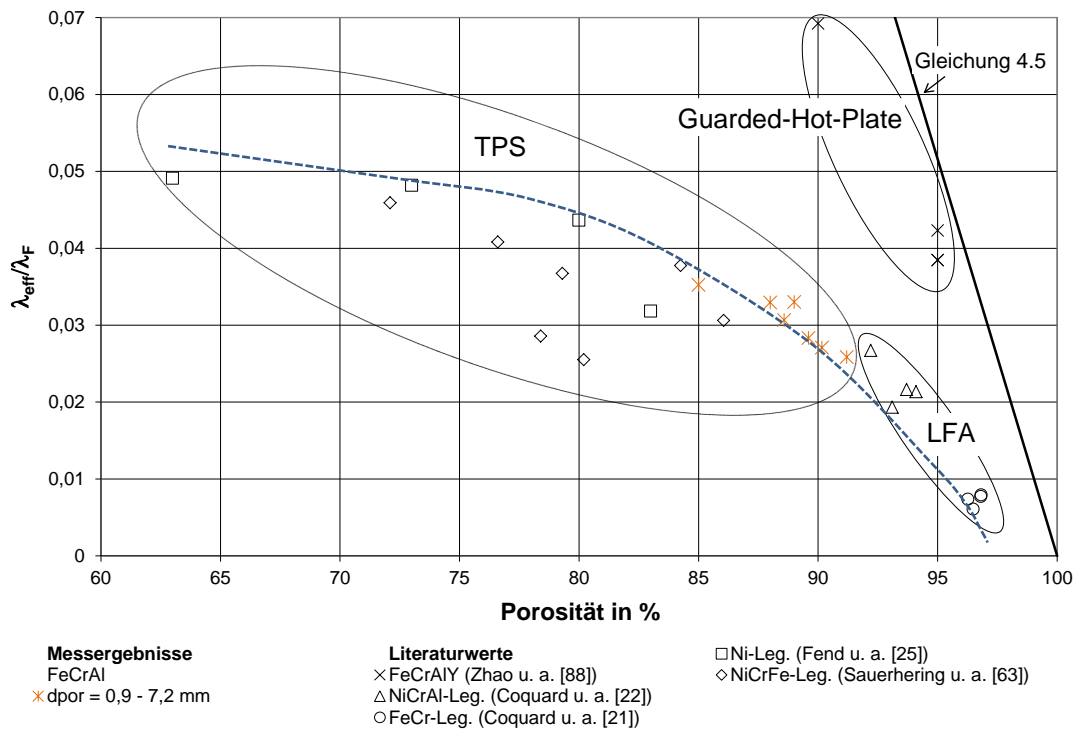


Abb. 7.18: Bezogene effektive Wärmeleitfähigkeit der offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) im Vergleich mit Literaturwerten

7.4.2 Vergleich mit den mathematischen Modellen

Für die Analyse der gemessenen Werte wurden die mathematischen Wärmeleitungsmodelle ausgewählt, die im Überblick kurz im Kapitel 4.4 erläutert sind. Die gemessenen Hohlkugelstrukturen aus Stählen (IFAM) und die offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) werden im Folgenden mit zehn Modellen verglichen. Als erstes werden die beiden Grundmodelle der Ersatzschaltung von Einzelwiderständen nach *Wiener* [85] verwendet. Das sind die Reihenschaltung-Kombination (Abbildung 4.6 a) und Parallelschaltung-Kombination (Abbildung 4.6 b), die bereits im Kapitel 4.4 dargestellt und mit den Gleichungen 4.11 und 4.12 berechnet wurden. Das nächste verwendete Modell ist dasjenige von *Bruggeman* [16], das am besten zu den Messergebnissen von *Solorzano u. a. [70]* passte und im Kapitel 4.3 mit der Gleichung 4.7 präsentiert ist. Das Bruggeman-Modell wurde speziell für Partikel in verschiedenen Formen entwickelt, die in einer kontinuierlichen Matrix verteilt sind. Für die Analyse wurde die modifizierte Version für sphärische Partikel aus der Arbeit von *Collishaw und Evans [19]* ausgewählt. Das Modell von Russell (*Collishaw und Evans [19]*) betrachtet, wie bereits im Kapitel 4.4 erwähnt wurde, mit der Gleichung

$$\lambda_{eff} = \lambda_F \frac{\varepsilon^{2/3} \lambda_G + \lambda_F (1 - \varepsilon^{2/3})}{\lambda_G (\varepsilon^{2/3} - \varepsilon) + \lambda_F (1 - \varepsilon^{2/3} + \varepsilon)} \quad (7.1)$$

das Feststoffgerüst in Form von kubischen Zellen mit einheitlicher Wanddicke. Das Doherty-Modell nach der Gleichung

$$\lambda_{eff} = \lambda_G + \frac{2}{3} \lambda_F (1 - \varepsilon) \quad (7.2)$$

das in *Collishaw und Evans [19]* dargestellt wird, betrachtet die Struktur als zweidimensionale eckige Zellen. Für die Analyse wird die modifizierte Version dieses Modells speziell für Strukturen mit niedriger Dichte verwendet. Das Modell von *Vnukov u. a. [83]*

$$\lambda_{eff} = \lambda_F \left[\frac{(1 - \varepsilon)}{3} + \frac{(2 + \varepsilon)^2}{6 (1 - \varepsilon) + 9 \varepsilon \frac{\lambda_F}{\lambda_G}} \right] \quad (7.3)$$

das bereits im Kapitel 4.4 beschrieben ist, wurde für die Analyse ausgewählt, da es eine besondere Kombination aus zwei Reihenschaltungen und einer Parallelschaltung miteinander darstellt. Das Modell von *Schuetz und Glicksman [66]* ist besonders interessant, weil dabei die sekundäre Porosität E_{sek} berücksichtigt wird.

$$\lambda_{eff} = \lambda_G + \left(\frac{2}{3} - \frac{1 - \varepsilon_{sek}}{3} \right) (1 - \varepsilon) \lambda_F \quad (7.4)$$

Zwei häufig analysierte Ansätze sind das Modell von Maxwell, das auch von *Solorzano u. a. [70]* verwendet wurde, und das von Zehner-Bauer-Schlünder (VDI Wärmeatlas [80]). Das Maxwell-Modell betrachtet Mehrphasenkomposite mit Kugeln aus einer Phase, die in einer zweiten Phase zufällig verteilt sind und deren Wärmeleitfähigkeit mit den Gleichungen 4.9 und 4.10 ermittelt wird. Das Zehner-Bauer-Schlünder-Modell betrachtet Modellpartikel, bei denen der Wärmestrom abwechselnd durch das Gas und die Partikel geleitet wird. Die Partikel können verschiedene Formen haben, die mit dem Parameter C_f angepasst werden. Bei dem Modelleinsatz wird hier $C_f = 1,25$ für Kugeln verwendet. Der Parameter B , der von der Form des Partikels abhängt, wird empirisch mit folgender Gleichung ermittelt:

$$B = C_f \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right)^{10/9}. \quad (7.5)$$

Die effektive Wärmeleitfähigkeit wird mit der Gleichung

$$\lambda_{eff} = (\gamma) \lambda_G + (1 - \gamma) \lambda_{eff}^* \quad (7.6)$$

ermittelt. Dabei ist $\gamma = 1 - \sqrt{1 - \varepsilon}$ und die λ_{eff}^* wird mit der Gleichung

$$\lambda_{eff}^* = \lambda_G \frac{2}{N} \left[\frac{B}{N^2} \frac{k-1}{k} \ln \frac{k}{B} - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{N} \right] \quad (7.7)$$

berechnet. Der Parameter N wird mit $N = 1 - \frac{B}{k}$ bestimmt und der Parameter $k = \frac{\lambda_F}{\lambda_G}$ ist das Verhältnis zwischen den Wärmeleitfähigkeiten des Feststoffes und des Gases. Das dargestellte Modell von Zehner-Bauer-Schlünder enthält nur den Leitungsterm durch Feststoff und Gas. Auf Basis dieses Modells wurde von *Meinert* [48] ein Korrigiertes Modell für Hohlkugelstrukturen entwickelt. Dabei wird die Gesamtporosität ε in die offene und die geschlossene unterteilt. Als geschlossene Porosität (Hohlkugelporosität ε_K) wird der Hohlraum in der Kugel bezeichnet, der vom Porendurchmesser d_{por} und der Dicke der Kugelschale, bzw. der Wanddicke d_{wand} abhängig ist und mit folgender Gleichung ermittelt kann:

$$\varepsilon_K = \frac{(d_{por} - 2 d_{wand})^3}{d_{por}^3}. \quad (7.8)$$

Als offene Porosität werden die Hohlräume zwischen den Kugeln bezeichnet. Die sogenannte Schüttungsporosität der Hohlkugelstruktur berechnet sich aus $\varepsilon_{HKS} = \varepsilon - \varepsilon_K$ und diese Porosität wird im Modell von Zehner-Bauer-Schlünder an Stelle der Gesamtporosität ε eingesetzt. Weiterhin wird mit Hilfe eines Widerstandsmodells die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_{eff-W} eines Würfels (der die poröse Hohlkugel repräsentiert) mit der Gleichung

$$\lambda_{eff-W} = \left[\frac{2}{\lambda_F} \frac{d_{wand}}{d_{por}} + \frac{X}{(X^2 - 1) \lambda_F + \lambda_G} \right]^{-1} \quad (7.9)$$

berechnet. Die Kantenlänge des Würfels ist im Fall der Modellierung von Hohlkugelstrukturen gleich dem Kugeldurchmesser d_{por} und die Wanddicke d_{wand} . Der Parameter x wird mit dem Verhältnis

$$X = \frac{1}{1 - 2 \left(\frac{d_{wand}}{d_{por}} \right)} \quad (7.10)$$

ermittelt. Die effektive Wärmeleitfähigkeit des Würfels (Gleichung 7.9) wird im Modell von Zehner-Bauer-Schlünder an Stelle der Feststoffleitfähigkeit λ_F eingesetzt.

Die Abbildung 7.19 präsentiert die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit der geschlossenzelligen Hohlkugelstrukturen aus Stählen und die modellierten Werte.

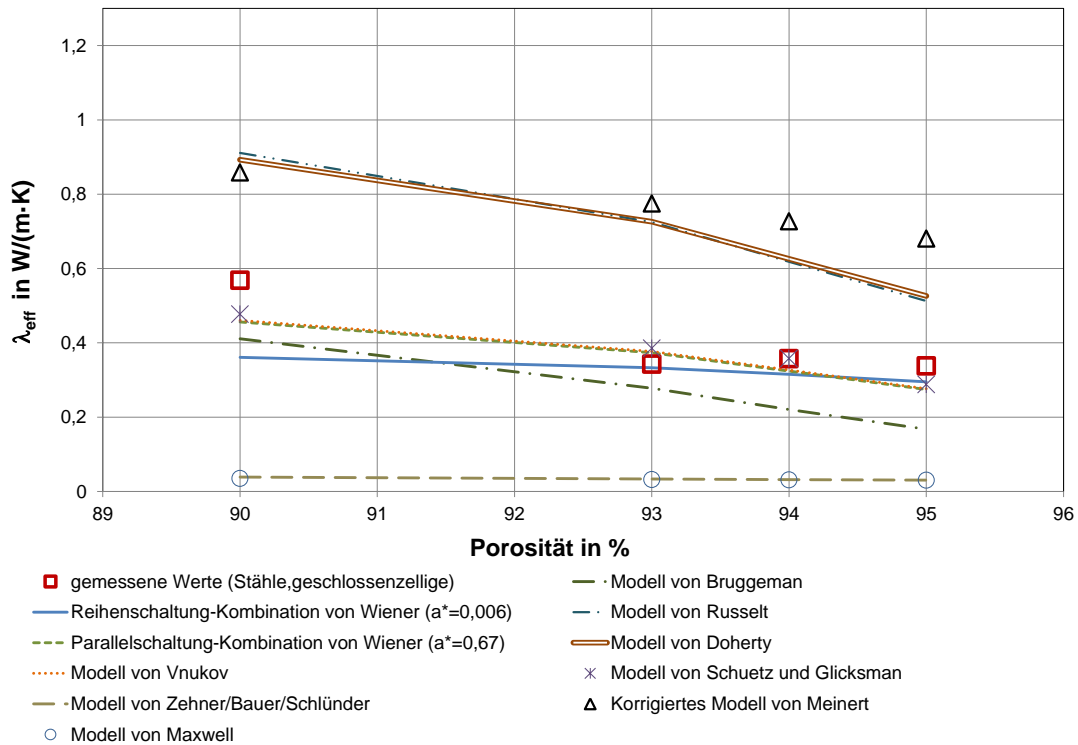


Abb. 7.19: Messergebnisse der Hohlkugelstrukturen aus Stählen (IFAM) im Vergleich mit den Modellen

Dabei liegen die Messergebnisse gut mit den Wiener-Modellen zusammen, weil der Strukturparameter a^* an die Messdaten angepasst wurde. Wenn man diesen Parameter analysiert, dann ergibt die Reihenschaltung-Kombination einen extrem niedrigen Parameter $a^* = 0,006$. Dies bedeutet, dass die Reihenschaltung von Feststoff und Gas nahezu nicht am Wärmetransport teilnimmt. Dagegen spielt die Parallelschaltung der beiden Phasen eine sehr wichtige Rolle. Dies widerspricht der realistischen Struktur und auf diesem Grund ist die Reihenschaltung-Kombination für die geschlossenzelligen Strukturen nicht geeignet. Die Anpassung der Parallelschaltung-Kombination ergibt mit $a^* = 0,67$ einen sinnvollen Strukturparameter. Er deutet darauf hin, dass mehr als die Hälfte der Wärme durch die Parallelschaltung von Feststoff- und Gasphase übertragen wird. Daraus folgt, dass die Hohlkugelstruktur mehr der Parallelschaltung-Kombination entspricht. Das Modell von Vnukov u. a. [83] liegt zusammen mit der Parallelschaltung-Kombination, da es wie bereits oben erwähnt wurde, eine Kombination aus zwei Reihenschaltungen und einer Parallelschaltung ist. Dieses Modell zeigt mit 9 % die geringste Abweichung zwischen den

Messwerten und dem Modell und beschreibt damit am besten den Wärmetransport in den betrachteten Hohlkugelstrukturen. Das zweitbeste Modell mit ca. 12 % Abweichung ist das von *Schuetz und Glicksman [66]*, vermutlich auf Grund der Berücksichtigung der sekundären Porosität. Das Bruggeman-Modell mit der Gleichung, das bei *Solorzano u. a. [70]* gut zu den Messergebnissen passt, zeigt ca. 16 % Abweichung von den dargestellten gemessenen Werten. Die Ursache dafür kann in den Strukturunterschieden zwischen den untersuchten regelmäßigen Hohlkugelstrukturen und den inhomogenen geschlossenzelligen Aluminium-Schäumen, die von *Solorzano u. a. [70]* analysiert wurden, liegen. Drei Modelle, die wesentlich höher als die gemessenen Werte liegen, sind das Russelt-Modell, das Doherty-Modell und das Korrigierte Modell von Meinert. Alle drei Modelle betrachten die Struktur als kubische Zellen, was vermutlich für die untersuchten Materialien nicht realistisch ist. Die niedrigsten Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit liefern die Modelle von Zehner-Bauer-Schlünder und von Maxwell, die nahezu auf gleichem Niveau liegen. Dabei betrachtet das Modell von Maxwell die Struktur als Kugeln, die bei großem Abstand überhaupt nicht miteinander kontaktieren. Beim Zehner-Bauer-Schlünder-Modell sind die Kugeln auf Grund der hohen Werte der Porosität zwischen 90 % – 95 % ebenfalls frei verteilt. Dies führt dazu, dass diese Modelle nicht die untersuchten Strukturen repräsentieren.

Die Abbildung 7.20 stellt die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit der offenzelligen FeCrAl-Strukturen im Vergleich zu den Modellrechnungen dar.

Dabei werden die Wiener-Modelle genauso wie bei den geschlossenzelligen Strukturen mit dem Strukturparameter a^* an die Messwerte angepasst. Die Parallelschaltung-Kombination ergibt mit $a^* = 0,75$ einen vernünftigen Wert des Strukturparameters. Dies bestätigt, dass die Parallelschaltung-Kombination mehr der Struktur der untersuchten offenzelligen Schäume entspricht. Die Werte des Bruggeman-Modells und des Vnukov-Modells liegen im Gegensatz zu den Ergebnissen bei den Hohlkugelstrukturen nicht mit den gemessenen Werten zusammen. Das Bruggeman-Modell nähert sich mit steigender Porosität an die gewonnenen Messergebnisse an, so dass es bei der Porosität von ca. 90 % am besten zu den Messergebnissen passt. Das Modell von Vnukov weicht leicht vom Bruggeman-Modell ab und zeigt eine maximale Abweichung von 9 % von den Messwerten. Das Russelt-Modell liefert zusammen mit dem Doherty-Modell wieder die höchsten Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit, genauso wie bei den Hohlkugelstrukturen. Das Korrigierte Modell von Meinert zeigt bei den offenzelligen Strukturen ganz andere Ergebnisse im Vergleich zu den Hohlkugelstrukturen, für die dieses Modell entwickelt wurde. Dabei sind in der Abbildung 7.20 nur drei Punkte dieses Modells eingetragen, weil nur bei drei Strukturen die Stegdicke bestimmt wurde. Dabei zeigen die ermittelten Werte einen Porengrößenein-

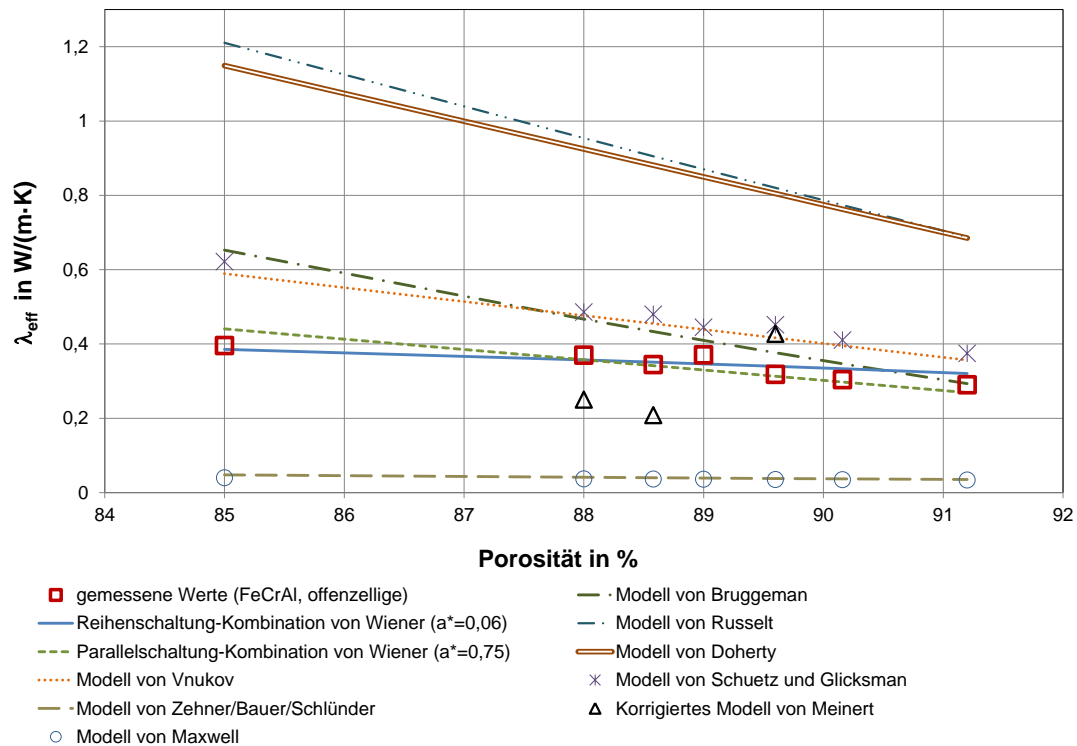


Abb. 7.20: Messergebnisse der offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) im Vergleich mit den Modellen

fluss, da die berechnete Wärmeleitfähigkeit beim größten Porendurchmesser 7,2 mm am höchsten liegt. Das Korrigierte Modell von Meinert kann daher die gemessenen Werte der Wärmeleitfähigkeit von offenzelligen Strukturen nicht optimal wiedergeben, da bei den Messungen kein Porengrößeneinfluss festgestellt wurde. Die niedrigsten Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit liefern, genauso wie bei den Hohlkugelstrukturen, die Modelle von Zehner-Bauer-Schlünder und Maxwell. Diese Berechnungswerte liegen wieder auf nahezu gleichem Niveau.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es bei solchen Schaum-Strukturen schwierig ist, die effektive Wärmeleitfähigkeit mathematisch zu beschreiben. Es ist sehr wichtig, bei den Modellen die geometrischen Parameter und strukturellen Besonderheiten der Materialien zu berücksichtigen. Aus diesem Grund sind Modelle immer nur für bestimmte Arten der zellularen metallischen Strukturen entwickelt worden und häufig auch nur für diese gültig. Es ist sehr kompliziert, ein universelles Modell für alle Arten der zellularen metallischen Strukturen zu entwickeln.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Charakterisierung der Wärmetransportvorgänge in zellularen metallischen Werkstoffen ist die thermophysikalische Eigenschaft Wärmeleitfähigkeit von besonderer Bedeutung. Die effektive Wärmeleitfähigkeit wurde bereits für unterschiedliche zellulare metallische Strukturen (geschlossenzellige, offenzellige, Hohlkugelstrukturen und Faserstrukturen) mit einer breiten Palette von Messverfahren experimentell untersucht. In den Veröffentlichungen darüber fehlen oft detaillierte Beschreibungen der Messdurchführung. Es gibt weiterhin nur wenige Untersuchungen, bei denen mit verschiedenen Messapparaturen unterschiedliche zellulare metallische Strukturen gemessen wurden. Es gibt keine Empfehlungen und keine Analyse der Schwierigkeiten bei der Durchführung der Messungen. Die Messergebnisse sind dabei zum Teil widersprüchlich und solche Einflüsse bei Raumtemperatur, wie beispielsweise der Typ der Struktur (offenzellig und geschlossenzellig) und Porendurchmesser sind nicht zu erkennen. Bei höheren Temperaturen sind kaum experimentelle Untersuchungen vorhanden. Außerdem ist es nicht deutlich, ab welcher Temperatur die Zellgröße der zellularen metallischen Strukturen einen Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit hat.

Ziel der vorliegenden Arbeit war die experimentelle Bestimmung der effektive Wärmeleitfähigkeit von drei Typen von zellularen metallischen Strukturen: offenzelligen, geschlossenzelligen und partiell geschlossenzelligen aus verschiedenen Grundmaterialien und mit unterschiedlichen Strukturparametern. Die Untersuchungen sollten mit unterschiedliche Messverfahren durchgeführt und dabei die Messunsicherheit und die Wiederholpräzision bewertet werden. Die Messergebnisse von verschiedenen Messapparaturen sollten miteinander, mit Literaturdaten und mit in der Literatur vorhandenen mathematischen Modellen verglichen werden.

Für die vorliegenden Untersuchung wurden offen- und geschlossenzellige Strukturen sowie Hohlkugelstrukturen (partiell geschlossenzellig) aus verschiedenen metallischen Grundmaterialien und mit unterschiedlichen Herstellungsmethoden produziert. Dabei wurde die Porosität und Porengröße variiert. Die Struktur der untersuchten Materialien wurde mit speziellen Apparaturen charakterisiert. Die Messungen bei Raumtemperatur wurden bei

allen Materialien mit der instationären TPS-Methode durchgeführt. Bei höheren Temperaturen wurden ausgewählte Materialien mit der TPS-Methode bis 250 °C, mit dem stationären Plattenverfahren PMA2 bis maximal 800 °C und mit der Laser-Flash-Apparatur bis maximal 700 °C untersucht.

Bei den eingesetzten Messmethoden wurden die **Bedingungen für die optimale Durchführung der Messungen** herausgearbeitet. Für die Messungen mit dem TPS-Messverfahren spielt die Oberflächenbearbeitung eine ganz wichtige Rolle. Dazu wurde eine Analyse der unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen durchgeführt. Diese ergab, dass die Oberflächen der Proben erodiert werden müssen, um einen guten Kontakt zwischen Sensor und Proben zu gewährleisten. Um eine optimale Auswertung der Messergebnisse zu erreichen, sollte die volumetrische Wärmekapazität der untersuchten Materialien bekannt sein. Dieser Wert kann entweder als Vorgabewert dienen, um die Auswertung der TPS-Messung zu erleichtern, oder als Bewertungskriterium der Messergebnisse dienen, wenn er bei der Modellanpassung von der TPS-Software selbst ermittelt wird. Beim Messaufbau im Ofen müssen die Besonderheiten der Probenhalterung berücksichtigt werden. Bei der instationären Laser-Flash-Messmethode müssen die Oberflächen der untersuchten Materialien planparallel sein und dazu speziell präpariert werden. Die Poren der zellularen Strukturen müssen mit einer Beschichtung geschlossen werden, die anschließend mit Graphit besprüht wird. Bei der Plattenmethode PMA2 ist es wichtig, die Thermoelemente auf dem Steg oder auf der Wand der zellularen metallischen Strukturen zu fixieren. Außerdem ist es erforderlich, beim Messaufbau aus zwei Proben eine Zwischenschicht (z. B. eine Fasermatte) zu verwenden.

Beim Einsatz aller obengenannten Messverfahren treten einige **Probleme bei den Untersuchungen** solcher komplexen und nicht immer regelmäßigen zellularen metallischen Strukturen auf. Beim TPS-Verfahren müssen zahlreiche Messungen durchgeführt werden, bis die optimalen Messparameter gefunden werden. Es ist nicht möglich, die Untersuchungen durchzuführen, wenn der Kontakt der Proben mit dem Sensor schlecht ist. Außerdem ist es kompliziert, hochleitende Materialien zu untersuchen und dabei die optimalen Parameter für die Messdurchführung zu finden. Die Porengrößen der zu untersuchenden Materialien erfordern theoretisch eine bestimmte minimale Sensorgröße, die verfügbaren Probenabmessungen dagegen eine maximale Sensorgröße. Da dabei häufig Widersprüche zwischen beiden Bedingungen auftreten, ist oftmals ein Kompromiss notwendig. Bei den Hochtemperaturmessungen ist es nicht möglich, die Reglerparameter für die Steuerung des Ofens für jeden Temperaturschritt anzugeben. Die Bestimmung der Messunsicherheit, die zur Angabe eines vollständigen Messergebnisses notwendig wäre, ist für das TPS-Verfahren gegenwärtig nicht möglich. Beim Plattenverfahren PMA 2 ist der Messaufbau

sehr aufwändig und das Hauptproblem ist die Kontaktierung der Thermoelemente mit der Oberfläche der zu untersuchenden Materialien. Es ist immer fraglich, wo sich die Thermoelemente befinden, auf dem Steg oder in der Pore. Weitere Probleme gibt es bei der Messung von hochleitenden Materialien, da der notwendige Temperaturgradient über die Probe dabei nicht realisiert werden kann. Weiterhin benötigen die Messungen viel Zeit bis zum Erreichen des stationären Zustandes. Bei den Messungen mit der Laser-Flash-Apparatur war es nicht möglich, bei den zellularen Strukturen vernünftige Messergebnisse zu gewinnen. Die Probenabmessungen sind sehr klein und repräsentieren nicht die gesamte Struktur. Daher streuen die Ergebnisse sehr stark, wenn mehrere Proben gemessen werden. Die Probenpräparation ist sehr komplex und aufwändig und die Messunsicherheit kann nicht mit vertretbarem Aufwand bestimmt werden.

Die gewonnenen Messergebnisse mit dem TPS-Verfahren belegen die Streuung der effektiven Wärmeleitfähigkeit bei Raumtemperatur auf Grund der relativ unregelmäßigen Struktur. Die effektive Wärmeleitfähigkeit nimmt bei allen Strukturen mit steigender Porosität ab. Dabei ist kein Porengrößeneinfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit vorhanden. Bei der Analyse der Messergebnisse von offenzelligen Strukturen und Hohlkugelstrukturen wurde festgestellt, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit der offenzelligen Strukturen niedriger liegt. Die Untersuchungen bei höheren Temperaturen zeigen, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur zunimmt. Im Temperaturbereich bis 250 °C gibt es offenbar keinen Porengrößeneinfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit. Bei höheren Temperaturen zeigen die zellularen Strukturen mit größeren Porendurchmessern höhere Werte der effektiven Wärmeleitfähigkeit. Beim Vergleich der Messergebnisse miteinander ergänzen die Werte des TPS-Messverfahrens die Ergebnisse mit dem Plattenverfahren und zeigen damit eine gute Übereinstimmung. Es wurde (soweit möglich) die Messunsicherheit und die Wiederholpräzision aller eingesetzten Verfahren analysiert. Die Messergebnisse wurden mit Literaturdaten verglichen und zeigen eine gute Übereinstimmung. Für einige der untersuchten Materialien wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit mit ausgewählten, in der Literatur vorhandenen mathematischen Modellen bestimmt und mit der gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeit verglichen. Es gibt zur Zeit keine universelles Modell für alle Arten der zellularen metallischen Strukturen, weil die geometrischen Parameter und Besonderheiten berücksichtigt werden müssen. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zum besseren Verständnis des Wärmetransportes in zellularen metallischen Strukturen und zeigt die Möglichkeiten, Ergebnisse, aber auch die Grenze der verwendeten Messmethoden.

Für zelluläre metallische Strukturen müssen auch zukünftig **weitere Untersuchungen** folgen. Für die Verbesserung des Einsatzes der Messverfahren sind bestimmte Maßnahmen

nötig. Bei TPS-Verfahren muss die Suche nach den optimalen Messparametern verbessert werden. Weiterhin ist es erforderlich, die Messunsicherheit zu bestimmen und den Einfluss solcher Parameter wie Sensorgröße, -positionierung, -alterung, -kontaktierung usw. noch genau quantitativ zu analysieren. Eine wichtige Voraussetzung dafür wäre die Fertigung großer Proben, um optimale Bedingungen im Verhältnis zwischen Porengröße und Sensorgröße zu ermöglichen. Die Hochtemperaturmessungen mit dem TPS-Messverfahren müssen auf den Temperaturbereich bis 700°C erweitert werden, um zusätzliche Messergebnisse zu gewinnen und die Strahlungseinflüsse mit vertretbarem Aufwand nachvollziehen zu können. Das TPS-Verfahren hat sich trotz der aufgetretenen Probleme als die am besten geeignete Messmethode für zelluläre metallische Strukturen herausgestellt. Bei Einsatz anderer Verfahren sind eine kritische Betrachtung der Messbedingungen und unter Umständen Veränderungen im Messaufbau notwendig. Bei der Plattenapparatur ist entscheidend, die Kontaktierung der Thermoelemente zu untersuchen und zu verbessern oder eine bessere Möglichkeit für die Temperaturbestimmung zu finden. Dabei muss auch der Einfluss der Schichten zwischen den zwei Proben analysiert werden. Für die Laser-Flash-Apparatur sind weitere Messungen zur Untersuchung des Einflusses der Beschichtung und der Probendicke auf die Messwerte notwendig. Dabei ist die mikroskopische Analyse der beschichteten Proben erforderlich. Eine ganz wichtige Aufgabe wäre es herauszufinden, bis zu welcher Porengröße überhaupt sinnvolle Ergebnisse mit dieser Methode zu erwarten sind. Bei der Laser-Flash-Apparatur ist es ebenfalls wichtig, die Messunsicherheit zu bestimmen.

Für die Analyse der Unterschiede in der effektiven Wärmeleitfähigkeit zwischen den offenzelligen, geschlossenzelligen und partiell geschlossenzelligen Strukturen müssen weitere Untersuchungen in einem größeren Porositätsbereich durchgeführt werden. Dabei sind zusätzliche, detaillierte Strukturanalysen erforderlich. Diese sind auch eine wichtige Voraussetzung für die mathematische Modellierung der Wärmeübertragung in diesen Strukturen. Die Entwicklung geeigneter mathematischer Modelle zur Beschreibung des Wärmetransportes in zellulären porösen Strukturen ist eine große Herausforderung für zukünftige Arbeiten. Dabei muss ein Kompromiss gefunden werden zwischen einer möglichst genauen Beschreibung der komplexen Struktur und dem mathematischen Aufwand, der in einem erträglichen Maß liegen muss. Für den Bereich höherer Temperaturen muss der Strahlungseinfluss in die Modellierung einbezogen werden. Dazu ist es notwendig, die Strahlungseigenschaften der zellulären Materialien zu untersuchen.

Die zellulären metallischen Strukturen sind Materialien, die auch zukünftig weiter entwickelt und verbessert werden. Auch auf dem Gebiet der Bestimmung ihrer thermophysikalischen Eigenschaften ist es daher notwendig, nach Verbesserungen und Weiterentwick-

lungen der Messmethoden und der mathematischen Modellierung zu streben. Nur dann können diese Materialien für wärmetechnische Zwecke optimal in der Praxis eingesetzt werden.

Literatur

- [1] A. N. Abramenko, A. S. Kalinchenko, Y. Burtser, V. A. Kalinichenko, S. A. Tanacva und I. P. Vasilenko. „Determination of the thermal conductivity of foam aluminium“. In: *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 72 No. 3 (1999), S. 370–373.
- [2] Abramowitz und Stegun. *Handbook of Mathematical Functions*. Cambridge Verlag, 2010.
- [3] J. S. Agapiou und M. F. Devries. „An Experimental Determination of the Thermal Conductivity of a 304L Stainless Steel Powder Metallurgy Material“. In: *Journal of Heat Transfer* 111 (1989), S. 281–288.
- [4] O. Andersen, C. Kostmann, G. Stephani und G. Korb. „Advanced porous structures made from intermetallic and superalloy fibers“. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Materials Processing for Properties and Performance (MP3)*. 2002.
- [5] O. Andersen und J. Meinert. „Heat Transfer and Fluid Flow in Sintered Metallic Fiber Structures“. In: *Materials Science Forum* 632-642 (2010), S. 1884–1889.
- [6] N. Babcsan, I. Meszaros und N. Hegman. „Thermal and electrical conductivity measurements on aluminium foams“. In: *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 34 (2003), S. 391–394.
- [7] H. D. Baehr und K. Stephan. *Wärme- und Stoffübertragung*. 4. Auflage. Springer, 2004.
- [8] J. Banhart. „Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams“. In: *Progress in Materials Science* 46 (2001), S. 559–632.
- [9] E. Baumeister. „Hohlkugelkomposit-Charakterisierung thermischer und mechanischer Eigenschaften eines neuen Leichtbauwerkstoffes“. Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Maschinenbau, 2004.
- [10] S. Baxter und T. T. Jones. In: *Polst. Polym.* (April 1972), S. 69.
- [11] A. Berg, J. Baumeister, G. Rausch und M. Busse. „Application of aluminium sponges in the adsorption refrigeration engineering“. In: *MetFoam2007*. 2007.

- [12] A. Bhattacharya, V. V. Calmidi und R. L. Mahajan. „Thermophysical properties of high porosity metal foams“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002), S. 1017–1031.
- [13] J. Blumm. „Das Laser-Flash-Verfahren - aktuelle Entwicklungen und Tendenzen“. In: *Symposium: Tendenzen in der Materialentwicklung und die Bedeutung von Wärmetransporteigenschaften*. 2007.
- [14] V. Bohac, M. K. Gustavsson, L. Kubicar und S. E. Gustafsson. „Parameter estimations for measurements of thermal transport properties with the hot disk thermal constants analyzer“. In: *Review of scientific instruments* 71 (2000), S. 2452–2455.
- [15] K. Boomsma und D. Poulikakos. „On the effective thermal conductivity of a three-dimensionally structured fluid-saturated metal foam“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (2001), S. 827–836.
- [16] D. A. G. Bruggeman. „Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen“. In: *Annalen der Physik* 417 (1936), S. 645–671.
- [17] V. V. Calmidi und R. L. Mahajan. „The Effective Thermal Conductivity of High porosity Fibrous Metal Foams“. In: *Journal of Heat and Mass Transfer* 121 (1999), S. 466–471.
- [18] M. Cherny, A. Finkelshteyn und E. Furman. „Permeability of aluminium foams produced by replication casting process“. In: *MetFoam2011*. 2011.
- [19] P. G. Collishaw und J. R. G. Evans. „An assessment of expressions for the apparent thermal conductivity of cellular materials“. In: *Journal of Materials Science* 29 (1994), S. 486–498.
- [20] R. Coquard und D. Baillis. „Numerical investigation of conductive heat transfer in high-porosity foams“. In: *Acta Materialia* 57 (2009), S. 5466–5479.
- [21] R. Coquard, M. Loretz und D. Baillis. „Conductive heat transfer in Metallic/ Ceramic open-cell foams“. In: *Advanced Engineering Materials* 10 No. 4 (2008), S. 1122–1128.
- [22] R. Coquard, D. Rochais und D. Baillis. „Experimental investigations of the coupled conductive and radiative heat transfer in metallic/ceramic foams“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52.21-22 (2009), S. 4907–4918.
- [23] R. Coquard, D. Rochais und D. Baillis. „Conductive and Radiative Heat Transfer in Ceramic and Metal Foams at Fire Temperatures“. In: *Fire Technology* 48 (2012), S. 699–732.

- [24] H.-P. Degischer und B. Kriszt. *Handbook of cellular metals Production, Processing, Applications*. Wiley-VCH, 2002.
- [25] Th. Fend, O. Reutter, J. Sauerhering, K. S. do Couto Aktay, R. Pitz-Paal und S. Angel. „Effective thermal conductivity of metallic foams determined with the transient plane source technique“. In: *17th ECTP Bratislava*. 2005.
- [26] T. Fiedler, E. Solorzano und A. Ö. „Numerical and experimental analysis of the thermal conductivity of metallic hollow sphere structures“. In: *Mate* 62 (2008), S. 1204–1207.
- [27] L. J. Gibson und M. F. Ashby. *Cellular solids Structure and properties - Second edition*. Cambridge University press, 2001.
- [28] D. Girlich. „Leichtbau-Verbundwerkstoff, Verfahren zu dessen Herstellung und Verwendung“. 102005023595B4. 30.11.2006.
- [29] L. R. Glicksman. *Heat transfer in foams*. Hrsg. von N. C. Hilyard und A. Cunningham. Chapman und Hall, 1994.
- [30] U. Gross, G. Barth, R. Wulf und L. T. S. Tran. „Messung der Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen mit unterschiedlichen Methoden“. In: *Freiberger Forschungsheft* A851 (1999), S. 96–115.
- [31] S. Gustafsson. 88009436. 16.1988.
- [32] S. Gustafsson. „Device for measuring thermal properties of a test substance - the Transient Plane Source (TPS) method“. 5,044,767. 3. Sep. 1991.
- [33] S. E. Gustafsson. „Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials“. In: *Re* 62 (1991), S. 797–804.
- [34] K. Hackeschmidt und D. Girlich. „Metallschäume in der Wärmetechnik“. In: *BINE Informationsdienst* (2005), S. 1–4.
- [35] U. Hammerschmidt und W. Sabuga. „Transient Hot Strip (THP) Method: Uncertainty Assessment“. In: *International Journal of Thermophysics* 21 (2000), S. 217–248.
- [36] Y. He. „Hot Disk: A Transient Plane Source Technique for rapid thermal conductivity measurement“. In: *Proceedings from the 28th International Symposium for Testing and Failure Analysis*. Phoenix Arizona, 2002, S. 513–522.
- [37] Yi He. „Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor. Part 1. Theoretical considerations“. In: *Thermochimica Acta* 436 (2005), S. 122–129.
- [38] W. Hohenauer und D. Lager. „Flash Methods to Examine Diffusivity and Thermal Conductivity of Metal Foams“. In: *Proc. 30 ITCC 17 ITES; Pittsburgh*. 2009.

- [39] J. P. Holman. *Heat Transfer*. 5th. McGraw-Hill, 1981.
- [40] E. Hornbogen und H. Warlimont. *Metallkunde: Aufbau und Eigenschaften von Metallen und Legierungen*. 4. Auflage. Springer, 2001.
- [41] ISO, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. Schweiz, 1995.
- [42] M. Kaviany. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. Springer, 1995.
- [43] K. Kitazono. „Superplastic Forming and Foaming of Cellular Aluminum Components“. In: *Materials Transactions* 47 No. 9 (2006), S. 2223–2228.
- [44] G. Laschet, J. Sauerhering, O. Reutter, T. Fend und J. Scheele. „Effective permeability and thermal conductivity of open-cell metallic foams via homogenization on a microstructure model“. In: *Computational Materials Science* (2008), S. 1–7.
- [45] M. Loretz, R. Coquard, D. Baillis und E. Maire. „Metallic foams: Radiative properties/comparison between different models“. In: *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 109 (2008), S. 16–27.
- [46] K. D. Maglic, A. Cezairliyan und V. E. Peletsky. *Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods - Part 2: Recommended Measurement Techniques and Practices*. Plenum Press New York, 1984.
- [47] J. C. Maxwell. *A treatise on electricity and magnetism*. Clarendon Press, Oxford, 1892.
- [48] J. Meinert. *Wärmeleitfähigkeitsmodell nach Zehner/Bauer/Schlünder*. Persönliche Mitteilungen. Mai 2011.
- [49] J. Meinert, O. Andersen, P. Quadbeck und J. Schmidt. „High-performance latent heat storage by means of cellular metals and composites“. In: *International Conference on Materials for Energy Karlsruhe*. 2010.
- [50] K. Nestler. „Offenporöse Aluminiumschwämme nach dem Platzhalterverfahren - Herstellung und Charakterisierung“. Magisterarb. Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2005.
- [51] K. Nestler, A. Berg, M. A. Rodriguez-Perez und M. Busse. „Multifunktionale Aluminiumschwämme durch Schmelzinfiltration von Platzhaltern“. In: *Aluminium* 82 (2006), S. 1–5.
- [52] R. Neugebauer, F. Wieland und H. Lang. „Einsatzmöglichkeiten von Metallschaum in Werkzeugmaschinen und Handlicheinrichtungen. Neue Werkstoffe ermöglichen Leichtbau bei hoher Dämpfung“. In: *Die Maschine* 1-2 (1996), S. 40–58.
- [53] A. Öchsner und C. Augustin. *Multifunctional metallic hollow sphere structures; Manufacturing and Properties and App.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

- [54] T. Ogushi, H. Chiba, H. Nakajima und T. Ikeda. „Measurement and analysis of effective thermal conductivities of lotus-type porous copper“. In: *Journal of applied physics* 95 Number 10 (2004), S. 5843–5847.
- [55] J. W. Paek, B. H. Kang, S. Y. Kim und J. M. Hyun. „Effective thermal conductivity and permeability of aluminium foam materials“. In: *International Journal of Thermophysics* Vol. 21 No.2 (2002), S. 454–464.
- [56] R. W. Powell. „Correlation of metallic thermal and electrical conductivities for both solid and liquid phases“. In: *International Journal Heat Mass Transfer* 8 (1965), S. 1033–1045.
- [57] P. Quadbeck. „Herstellung und Eigenschaften von Superlegierungen mit zellularem Gefügebau“. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg, Technischen Fakultät, 2005.
- [58] P. Quadbeck, K. Kümmel, R. Hauser, G. Standke, J. Adler und G. Stephani. „Open Cell Metal Foams - Application-oriented Structure and Material Selection“. In: *Cellular Materials*. 2010.
- [59] P. Quadbeck, K. Kümmel, R. Hauser, G. Standke, J. Adler, G. Stephani und B. Kieback. „Structural and Material Design of Open-cell Powder Metallurgical Foams“. In: *Advanced Engineering Materials* 13 (2011), S. 1–7.
- [60] D. T. Queheillalt, Y. Katsumura und H. N. G. Wadley. „Synthesis of stochastic open cell superalloy foams“. In: *Scripta Materialia* 50 (2004), S. 313–317.
- [61] H. Reiss. *Radiative Transfer in Nontransparent, Dispersed Media*. Springer, 1988.
- [62] D. R. Salmon und R. P. Tye. „An intercomparison of heat flow meter apparatus within the United Kingdom and Eire“. In: *High Temperatures - High Pressures* 32 (2000), S. 19–28.
- [63] J. Sauerhering und O. Reutter. „Temperature dependency of the effective thermal conductivity of nickel based metal foams“. In: *Fourth International Conference on Nanochannels, Microchannels and Minichannels*. 2006.
- [64] W. Schatt, K.-P. Wieters und B. Kieback. *Pulvermetallurgie, Technologien und Werkstoffe*. Springer, 2007.
- [65] E.-U. Schlünder und E. Tsotsas. *Wärmeübertragung in Festbetten, durchmischten Schüttgütern und Wirbelschichten*. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1988.
- [66] M. A. Schuetz und L. R. Glicksman. „A basic study of heat transfer through foam insulation“. In: *Journal of Cellular Plastics* (1984), S. 114–121.
- [67] K. Schwartzwalder, Holly und A. V. Somers. „Method of making porous ceramic articles“. 3,090,094. 1963.

- [68] R. Siegel, J. R. Howell und J. Lohrengel. *Wärmeübertragung durch Strahlung*. Bd. 1. Springer, 1988.
- [69] E. Solorzano, M. Hirschmann, M. A. Rodriguez-Perez, C. Körner und J. A. „Thermal conductivity of AZ91 magnesium integral foams measured by the Transient Plane Source method“. In: *Materials Letters* 62 (2008), S. 3960–3962.
- [70] E. Solorzano, J. A. Reglero, M. A. Rodriguez-Perez, D. Lehmhus, M. Wichmann und J. A. de Saja. „An experimental study on the thermal conductivity of aluminium foams by using the transient plane source method“. In: *Journal of Heat and Mass Transfer* 51 (2008), S. 6259–6267.
- [71] E. Solorzano, M. A. Rodriguez-Perez und J. A. de. „Thermal Conductivity of Cellular Metals Measured by the Transient Plane Source Method“. In: *Advanced Engineering Materials* 10 No. 6 (2008), S. 596–602.
- [72] E. Solorzano, M. A. Rodriguez-Perez, J. Lazaro und J. A. de Saja. „Influence of Solid Phase Conductivity and Cellular Structure on the Heat Transfer Mechanisms of Cellular Materials: Diverse Case Studies“. In: *Advanced Engineering Materials* 11 No. 10 (2009), S. 818–824.
- [73] E. Solorzano, M. A. Rodriguez-Perez, J. A. Reglero und J. A. de S. „Density gradients in aluminium foams: characterisation by computer tomography and measurements of the effective thermal conductivity“. In: *J. Mater Sci* (2007), S. 2557–2564.
- [74] B. Sosnik. 2 434 775. 1943.
- [75] G. Stephani, P. Quadbeck und O. Anderson. „New multifunctional lightweight materials based on cellular metal-manufacturing, properties and applications“. In: *Journal of Physics: Conference Series* 165 (2009).
- [76] Bashir M. Suleiman, Izhar-Ul-Haq, E. Karawacki und S. E. Gustafsson. „Thermal conductivity of the ceramic Cedorite 130P between 88 and 280 K measured using the transient plane source technique“. In: *Journal of Applied Physics* 25 (1992), S. 813–817.
- [77] Al. D. Sullins und K. Daryabeigi. „Effective thermal conductivity of high porosity open cell nickel foam“. In: *35th AIAA Thermophysics Conference*. 2001.
- [78] D. J. Thewsey und Y. Y. Zhao. „Thermal conductivity of porous copper manufactured by the lost carbonate sintering process“. In: *Physica Status Solidi (a)* 205 (2008), S. 1126–1131.

- [79] S. Tzeng und W. Ma. „A novel approach to manufacturing and experimental investigation of closed-cell Al foams“. In: *J. Adv. Manuf. Technol.* 28 (2006), S. 1122–1128.
- [80] *VDI Wärmeatlas*. Springer Verlag, 2006.
- [81] C. Veyhl, T. Fiedler, O. Andersen, J. Meinert, T. Bernthaler, I. V. Belova und G. E. Murch. „On the thermal conductivity of sintered metallic fibre structures“. In: *International Journal Heat Mass Transfer* 55 (2012), S. 2440–2448.
- [82] J. Vicente, F. Topin, J-V. Daurelle und F. Rigollet. „Thermal Conductivity of Metallic Foam: Simulation on Real X-ray Tomographed Porous Medium and Photothermal Experiments“. In: *13th Intern. Heat Transfer Conf., Sydney, Australia*. 2006.
- [83] S. P. Vnukov, V. A. Ryabov und D. V. Fedoseev. „Thermal conductivity of glass-fiber systems“. In: *Inzhenerno-Fisicheski Zhurnal* 21 (1971), S. 797–803.
- [84] U. Waag, G. Stephani, O. Andersen, B. Kieback, R. Kretzschmar, H. Venghaus und J. Färber. „Eigenschaften und Anwendung von metallischen Hohlkugelstrukturen“. In: *23. Hagener Symposium Pulvermetallurgie mit Fachaussstellung*. 2004.
- [85] O. Wiener. „Die Theorie des Mischkörpers für das Feld der stationären Strömung“. In: *Abhandlungen der Mathematischen-Physischen Klasse der Königlichen Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften* 32 (1912), S. 509–604.
- [86] R. Wulf. „Wärmeleitfähigkeit von hitzebeständigen und feuerfesten Dämmstoffen-Untersuchungen zu Ursachen für unterschiedliche Messergebnisse bei Verwendung verschiedener Messverfahren“. Diss. TU Bergakademie Freiberg, 2009.
- [87] R. Wulf, G. Barth und U. Gross. „Plattenmessapparatur zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen bei Temperaturen bis 1650 °C“. In: *Keramische Zeitschrift* 57 (2005), S. 84–89.
- [88] C. Y. Zhao, T. J. Lu, H. P. Hodson und J. D. Jackson. „The temperature dependence of effective thermal conductivity of open-celled steel alloy foams“. In: *Materials Science and Engineering A* 367 (2004), S. 123–131.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Offen- und geschlossenzellige Strukturen und Hohlkugelstrukturen	15
2.2	Sekundäre Porosität des Matrixmaterials einer Hohlkugelstruktur (Raster- elektronenmikroskop, IWW, TU BAF)	16
2.3	Mikroskopaufnahme einer offenzelligen Struktur mit den wichtigsten geo- metrischen Größen	17
2.4	Mikroskopaufnahme einer Hohlkugelstruktur mit den wichtigsten geome- trischen Größen	18
2.5	Fotoaufnahme der geschlossenzelligen aufgeschäumten AlSi7-Strukturen . .	18
3.1	Mikroskopaufnahme von einer offenzelligen Struktur und idealisierte Kno- tendarstellung	24
4.1	Effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Porosität bei Raum- temperatur	36
4.2	Effektive Wärmeleitfähigkeit der Metallschäume bezogen auf die Wärme- leitfähigkeit des Feststoffes bei Raumtemperatur	38
4.3	Effektive Wärmeleitfähigkeit der Metallschäume bezogen auf die Wärme- leitfähigkeit des Feststoffes bei Raumtemperatur im Porositätsbereich ab 80 %	40
4.4	Effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur	42
4.5	Effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von Temperatur, Porosität und Druck	45
4.6	Widerstandsmodelle: Kombination aus Reihenschaltung und Parallelschal- tung	47
5.1	Herstellung von Hohlkugelstrukturen [Quelle: IFAM]	53
5.2	Bildaufnahme vom Messmikroskop für die Bestimmung der Porendurch- messer bei einer Hohlkugelstruktur (IWTT, TU BAF)	55
5.3	Auswertung für die Bestimmung der sekundären Porosität bei Hohlkugel- strukturen (IWW, TU BAF)	56

5.4	Auswertung für die Bestimmung der Stegdicke bei Hohlkugelstrukturen mit der Lichtmikroskopie (IWTT, TU BAF)	57
5.5	Bestimmung der Stegdicke bei Hohlkugelstrukturen mit dem Messmikroskop (IWTT, TU BAF)	57
5.6	Bestimmung der Stegfläche bei Hohlkugelstrukturen mit dem System „PO-RESCAN“ (IKTS)	58
5.7	Computer-Tomographie-Aufnahme der Hohlkugelstruktur (IKGB, TU BAF)	58
5.8	MSZ Proben	59
5.9	Herstellung der geschlossenzelligen aufgeschäumten Strukturen (<i>Neugebauer u. a. [52]</i>)	60
5.10	Bildaufnahme vom Messmikroskop für die Bestimmung der Porendurchmesser bei aufgeschäumten Strukturen (IWTT, TU BAF)	61
5.11	Herstellung von offenzelligen Strukturen (<i>Quadbeck [57], Queheillalt u. a. [60]</i>)	62
5.12	Eigenschaften des Grundmaterials FeCrAl	64
5.13	Auswertung für die Bestimmung der sekundären Porosität bei offenzelligen Strukturen (FeCrAl; $d_{por} = 1,9\text{ mm}$; IWW TU BAF)	66
5.14	Besonderheiten der Stegdickenbestimmung (IKTS)	66
5.15	Auswertungsdatei der Stegdickenbestimmung (IKTS)	67
5.16	Fotoaufnahme der offenzelligen AlMgSi0,5-Struktur	67
5.17	Bestimmung der Stegfläche bei einer offenzelligen Struktur mit dem System „PORESCAN“(IKTS)	67
6.1	Schematische Darstellung der Plattenmessapparatur PMA2 (<i>Wulf [86]</i>)	69
6.2	Probenaufbau PMA2 zur Messung der zellularen Strukturen	69
6.3	Fixierte Thermoelemente auf der Oberfläche der offenzelligen Struktur (PMA2)	70
6.4	Anordnung der Thermoelemente auf der Probenoberfläche (PMA2)	70
6.5	Wärmeausbreitung vom Sensor in die Proben (TPS, <i>Solorzano u. a. [70]</i>)	71
6.6	Summe der Sensitivitätskoeffizienten als Funktion des Quadrates der dimensionslosen Zeit $\tau^2 = t/\theta = \frac{at}{R^2}$ (TPS, <i>Bohac u. a. [14]</i>)	73
6.7	Sensorabstand, Betriebsanleitung TPS 2500S	74
6.8	Kapton-Sensor mit dem Durchmesser 29,2 mm (TPS)	75
6.9	Messaufbau für die Raumtemperaturmessungen (TPS)	76
6.10	Messaufbau für die Hochtemperaturmessungen (TPS)	77
6.11	Anzeige der Temperaturdrift im Sensor in den ersten 40 Sekunden vor dem Beginn der Messungsdurchführung (TPS, statistische Streuung)	78

6.12	Messkurve des TPS Messverfahrens	79
6.13	Messergebnisse und Anpassung des Modells an die Messwerte (TPS)	80
6.14	Schematische Darstellung des Laser-Flash-Verfahrens [Quelle: Netzsch] . .	81
6.15	Ausschnitt aus dem Messprotokoll für eine aufgeschäumte Struktur aus AlSiMg0,5 ($d_{por} = 1,2 - 8,2\text{ mm}$, Raumtemperatur, IWU)	84
6.16	Präparierte offenzellige Metallschaum-Probe aus FeCrAl (HO) für die LFA- Messungen	85
6.17	Vergleich der Messergebnisse von LFA und TPS für offenzellige Strukturen aus FeCrAl ($d_{por} = 0,9\text{ mm}$; $d_{por} = 1,3\text{ mm}$, HO)	86
6.18	Kontakt des Thermoelementes mit der Oberfläche (PMA2)	87
6.19	Verhältnis der Abweichung der Anzeigewerte der einzelnen Thermoelemen- te einer Messebene zur Temperaturdifferenz in der Probe (AlSi7Mg0,3- Struktur, PMA2, MP)	88
7.1	Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) in Abhängigkeit von der Oberflächen- bearbeitung für offenzellige Strukturen aus FeCrAl (HO) und eine Hohlku- gelstruktur Stahl 1.4401 (IFAM)	90
7.2	Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) von Hohlkugelstrukturen (IFAM) . . .	91
7.3	Effektive Wärmeleitfähigkeit von geschlossenzelligen Strukturen in Abhän- gigkeit von der Porosität (TPS, Sensordurchmesser 29,2 mm)	92
7.4	Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) der offenzelligen Strukturen aus Fe- CrAl (HO)	93
7.5	Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) der untersuchten offenzelligen Strukturen	96
7.6	Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes für alle untersuchten Strukturen	97
7.7	Effektive Wärmeleitfähigkeit (TPS) bezogen auf die Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes im Porositätsbereich 80 – 96 % (Hohlkugelstrukturen und offen- zellige Schäume)	98
7.8	Stegfläche ausgewählter Strukturen in Abhängigkeit von der Porosität . . .	99
7.9	Aufnahmen mit dem Lichtmikroskop	100
7.10	Effektive Wärmeleitfähigkeit der Hohlkugelstrukturen (IFAM) in Abhän- gigkeit von der Temperatur, (TPS, Kapton-Sensor mit Durchmesser 12,8 mm)	102
7.11	Effektive Wärmeleitfähigkeit der Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 mit $d_{por} = 4,6\text{ mm}$ (IFAM) in Abhängigkeit von der Temperatur (TPS, PMA2)	103

7.12 Effektive Wärmeleitfähigkeit der Hohlkugelstruktur aus Eisen mit $E = 93\%$ und $d_{por} = 2,5$ mm (IFAM) in Abhängigkeit von der Temperatur (TPS, PMA2)	104
7.13 Effektive Wärmeleitfähigkeit der offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) in Abhängigkeit von der Temperatur (TPS)	105
7.14 Effektive Wärmeleitfähigkeit offenzelliger Strukturen aus FeCrAl (HO) in Abhängigkeit von der Temperatur (TPS, PMA2)	106
7.15 Messergebnisse der PMA2 für die Hohlkugelstrukturen aus Stahl 1.4841 ($E = 95\%$, $d_{por} = 4,6$ mm, IFAM) und Eisen ($E = 93\%$, $d_{por} = 2,5$ mm, IFAM) mit Angabe der Messunsicherheit	110
7.16 Messergebnisse der PMA2 für die offenzellige FeCrAl-Struktur ($d_{por} = 1,9$ mm; $d_{por} = 2,8$ mm, HO) mit Angabe der Messunsicherheit	110
7.17 Bezogene effektive Wärmeleitfähigkeit der geschlossenzelligen Hohlkugelstrukturen (IFAM) im Vergleich mit Literaturwerten	112
7.18 Bezogene effektive Wärmeleitfähigkeit der offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) im Vergleich mit Literaturwerten	113
7.19 Messergebnisse der Hohlkugelstrukturen aus Stählen (IFAM) im Vergleich mit den Modellen	116
7.20 Messergebnisse der offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) im Vergleich mit den Modellen	118
A.1 Datenblatt von Eisen [Quelle: chemie.de]	138
A.2 Datenblatt von Stahl 1.4841 [Quelle: ThyssenKrupp Materials International]	139
A.3 Datenblatt von Stahl 1.4767 [Quelle: ThyssenKrupp Materials International]	139
A.4 Datenblatt von Stahl 1.4404 [Quelle: ThyssenKrupp Materials International]	140
A.5 Datenblatt von Stahl 1.4401 [Quelle: ThyssenKrupp Materials International]	140
A.6 Datenblatt von AlMgSi0,5 [Quelle: CosmosAluminium]	141
A.7 Datenblatt von AlSi7Mg0,3 [Quelle: HYDRO]	141
A.8 Datenblatt von AK7Π4 [Quelle: Composite Materials]	141
A.9 Hohlkugelstruktur aus Eisen (IFAM) mit $E = 81\%$, $d_{por} = 1,6$ mm (IWW, TU BAF)	142
A.10 Hohlkugelstruktur aus Eisen (IFAM) mit $E = 93\%$, $d_{por} = 2,5$ mm (IWW, TU BAF)	142
A.11 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 (IFAM) mit $E = 93\%$, $d_{por} = 3,8$ mm (IWW, TU BAF)	143
A.12 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 (IFAM) mit $E = 95\%$, $d_{por} = 4,6$ mm (IWW, TU BAF)	143

A.13 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4767 (IFAM) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 3,7$ mm (IWW, TU BAF)	144
A.14 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4404 (IFAM) mit $E = 94\%$, $d_{por} = 1,5$ mm (IWW, TU BAF)	144
A.15 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4401 (IFAM) mit $E = 95\%$, $d_{por} = 2,5$ mm (IWW, TU BAF)	145
A.16 Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 89\%$, $d_{por} = 3,1$ mm (IWTT, TU BAF)	145
A.17 Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 2,9$ mm (IWTT, TU BAF)	146
A.18 Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 5,9$ mm (IWTT, TU BAF)	146
A.19 Hohlkugelstrukturen aus Eisen (IFAM)	147
A.20 Hohlkugelstrukturen aus Stahl 1.4841 (IFAM)	147
A.21 Hohlkugelstrukturen (IFAM)	148
A.22 Hohlkugelstrukturen	148
A.23 Offenzellige Strukturen aus FeCrAl (HO)	148
A.24 Hohlkugelstruktur aus Eisen (IFAM) mit $E = 81\%$, $d_{por} = 1,6$ mm (IWW, TU BAF)	149
A.25 Hohlkugelstruktur aus Eisen (IFAM) mit $E = 93\%$, $d_{por} = 2,5$ mm (IWW, TU BAF)	150
A.26 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 (IFAM) mit $E = 93\%$, $d_{por} = 3,8$ mm (IWW, TU BAF)	151
A.27 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 (IFAM) mit $E = 95\%$, $d_{por} = 4,6$ mm (IWW, TU BAF)	152
A.28 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4767 (IFAM) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 3,7$ mm (IWW, TU BAF)	153
A.29 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4404 (IFAM) mit $E = 94\%$, $d_{por} = 1,5$ mm (IWW, TU BAF)	154
A.30 Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4401 (IFAM) mit $E = 95\%$, $d_{por} = 2,5$ mm (IWW, TU BAF)	155
A.31 Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 89\%$, $d_{por} = 3,1$ mm (IWTT, TU BAF)	156
A.32 Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 2,9$ mm (IWTT, TU BAF)	156
A.33 Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 5,9$ mm (IWTT, TU BAF)	157

A.34 Offenzellige Struktur aus FeCrAl (HO) mit $d_{por} = 1,9$ mm (IKTS)	157
A.35 Offenzellige Struktur aus FeCrAl (HO) mit $d_{por} = 3,6$ mm (IKTS)	158
A.36 Offenzellige Struktur aus FeCrAl (HO) mit $d_{por} = 7,2$ mm (IKTS)	158
A.37 Offenzellige Struktur aus AlSi7Mg0,3 (MP) mit $d_{por} = 2,5$ mm (IKTS)	158
A.38 Hohlkugelstrukturen (IFAM, HO)(IKTS)	159
A.39 Offenzellige Struktur aus AlMgSi0,5 (CM) (IKTS)	159

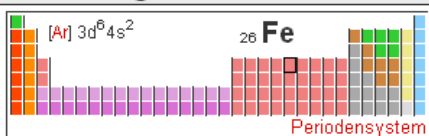
Tabellenverzeichnis

4.1	Literaturüberblick der bisher untersuchten Materialien	30
4.1	Literaturüberblick der bisher untersuchten Materialien	31
5.1	Untersuchte Hohlkugelstrukturen	52
5.2	Thermophysikalische Eigenschaften der Grundmaterialien	54
5.3	Strukturparameter der untersuchten Hohlkugelstrukturen	54
5.4	Untersuchte aufgeschäumte Strukturen	59
5.5	Thermophysikalische Eigenschaften des Grundmaterials	60
5.6	Untersuchte offenzellige Strukturen	62
5.7	Thermophysikalische Eigenschaften des Grundmaterials	64
5.8	Strukturparameter der untersuchten offenzelligen Strukturen	65
6.1	Eingesetzte Kapton-Sensorgrößen	75
7.1	Streuung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von aufgeschäumten Strukturen (IWU), Sensordurchmesser 29,3 mm	91
7.2	Messwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit von offenzelligen FeCrAl-Strukturen (HO) in Abhängigkeit vom Sensordurchmesser (d_{Sensor})	94
7.3	Verhältnis zwischen Durchmesser des Sensors und Durchmesser der Poren bei den offenzelligen FeCrAl-Strukturen (HO)	95
7.4	Wiederholpräzision (WP) der TPS-Messmethode bei Raumtemperatur . .	107
7.5	Wiederholpräzision (WP) der LFA bei den offenzelligen Strukturen aus FeCrAl (HO) bei Raumtemperatur	108

A Anhang

A.1 Datenblätter der Grundmaterialien

A.1.1 Grundmaterialien für Hohlkugelstrukturen

Eigenschaften	
 <p>Periodensystem</p>	
Allgemein	
Name, Symbol, Ordnungszahl	Eisen, Fe, 26
Serie	Übergangsmetalle
Gruppe, Periode, Block	8, 4, d
Aussehen	metallisch glänzend mit einem gräulichen Farbton
Massenanteil an der Erdhülle	4,7 %
Physikalisch	
Aggregatzustand	fest
Modifikationen	
Kristallstruktur	kubisch raumzentriert
Dichte	7,874 g/cm ³
Mohshärte	4,0
Magnetismus	ferromagnetisch
Spezifische Wärmekapazität	452 J/(kg · K)
Elektrische Leitfähigkeit	9,93 · 10 ⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	80,2 W/(m · K)

CHEMIE.DE

INFOTHERM[®]
everyday science

Abb. A.1: Datenblatt von Eisen [Quelle: chemie.de]


<div>ThyssenKrupp Materials International</div> <div></div> <div>ThyssenKrupp</div>	Stahlbezeichnung					Austenitischer hitzebeständiger Stahl TK 1.4841		
	Kurzname			Werkstoff-Nr.				
	X15CrNiSi25-21			1.4841				
Chemische Zusammensetzung (Schmelzenanalyse in %)								
Erzeugnis- form	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
C, H, P, L	≤ 0,20	≤ 1,50-2,50	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,015	24,00-26,00	19,00-22,00	≤ 0,11
T _{WS}	≤ 0,20	≤ 1,50-2,50	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,030	24,00-26,00	19,00-22,00	
Anhaltsangaben über physikalische Eigenschaften								
Dichte bei 20 °C	Wärmeleitfähigkeit W/m K bei		spez. Wärmekapazität bei 20 °C		spez. elektrischer Widerstand bei 20 °C			
kg/dm³	20 °C	500 °C	J/kg K		Ω mm²/m			
7,9	15	19	500		0,9			

Abb. A.2: Datenblatt von Stahl 1.4841 [Quelle: ThyssenKrupp Materials International]

ThyssenKrupp VDM Legierung		Aluchrom Y			
Spezifikation					
D	Werkstoff-Nr.	1.4767			
	Kurzzeichen	X 8 CrAl 20-5			
Chemische Zusammensetzung (Gewicht – %)					
Nickel		max. 0.30			
Chrom		20.0 22.0			
Eisen		Rest			
Kohlenstoff		0.01 0.1			
Mangan		max. 0.3			
Silizium		max. 0.5			
Kupfer					
Aluminium		5.0 6.0			
andere Elemente		Zr max. 0.01 0.10, Y 0.05 0.15			
Physikalische Werte bei Raumtemperatur					
Dichte (g/cm³)		7.2			
Spez. Wärme (J/kgK)		460			
Wärmeleitfähigkeit (W/mK)		13.0			
Elektrischer Widerstand (µΩ cm)		139			
Elastizitätsmodul (kN/mm²)		210			
Ausdehnungsbeiwert von 20 °C bis (10⁶/K)		100	200	400	600
		10.6	11.3	12.3	13.0

Abb. A.3: Datenblatt von Stahl 1.4767 [Quelle: ThyssenKrupp Materials International]

Werkstoff-Nr.

1.4404 nach DIN 17441/EN 10 088-2

Kurznamen

D (DIN/EN) X 2 CrNiMo 17-12-2

USA (ASTM) 316 L

GB (BS) 316 S 11

F (NF) Z 3 CND 17-12-02

S (SIS) 2348

Chemische Zusammensetzung

(in Gewichts-%) ^a

	C	Cr	Mo	Ni
mind.	–	16,5	2,0	10,0
max.	0,03	18,5	2,5	13,0

^a Je nach gewünschten Eigenschaften können innerhalb der Analysengrenzen besondere Vereinbarungen getroffen werden.

Physikalische Eigenschaften

	Dichte kg/dm ³	Elastizitätsmodul in kN/mm ² bei						Wärmeausdehnung in 10 ⁻⁶ · K ⁻¹ zwischen 20 °C und				
		20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
	7,98	200	194	186	179	172	165	16,5	17,5	17,5	18,5	18,5
	Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C W/m · K			Spezifische Wärme- kapazität bei 20 °C J/kg · K			Elektrischer Widerstand bei 20 °C Ω · mm ² /m			Magnetisierbarkeit		
	15			500			0,75			nicht vorhanden ²⁾		

²⁾ NIROSTA® 4404 kann im abgeschreckten Zustand leicht magnetisch sein.
 Die Magnetisierbarkeit nimmt mit steigender Kaltverfestigung zu.

Herausgeber: Krupp Thyssen Nirosta GmbH · 47794 Krefeld · www.nirosta.de

Abb. A.4: Datenblatt von Stahl 1.4404 [Quelle: ThyssenKrupp Materials International]

Werkstoff-Nr.

1.4401 nach DIN 17441/EN 10088-2

Kurznamen

D (DIN/EN) X 5 CrNiMo 17-12-2

USA (ASTM) 316

GB (BS) 316 S 31

F (NF) Z 7 CND 17-11-02

S (SIS) 2347

Chemische Zusammensetzung

(in Gewichts-%) ^a

	C	Cr	Mo	Ni
mind.	–	16,5	2,0	10,0
max.	0,07	18,5	2,5	13,0

^a Je nach gewünschten Eigenschaften können innerhalb der Analysengrenzen besondere Vereinbarungen getroffen werden.

Physikalische Eigenschaften

Dichte kg/dm ³	Elastizitätsmodul in kN/mm ² bei						Wärmeausdehnung in 10 ⁻⁶ · K ⁻¹ zwischen 20 °C und				
	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
7,98	200	194	186	179	172	165	16,5	17,5	17,5	18,5	18,5


Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C W/m · K	Spezifische Wärme- kapazität bei 20 °C J/kg · K	Elektrischer Widerstand bei 20 °C Ω · mm ² /m	Magnetisierbarkeit
15	500	0,75	nicht vorhanden ²⁾

²⁾ NIROSTA® 4401 kann im abgeschreckten Zustand leicht magnetisch sein.
 Die Magnetisierbarkeit nimmt mit steigender Kaltverfestigung zu.

Herausgeber: Krupp Thyssen Nirosta GmbH · 47794 Krefeld · www.nirosta.de

Abb. A.5: Datenblatt von Stahl 1.4401 [Quelle: ThyssenKrupp Materials International]

A.1.2 Grundmaterial für aufgeschäumte Strukturen



ALLOY DATA SHEET
EN AW 6060 [AlMgSi0.5]

ALLOY TYPE:
GENERAL EXTRUSION

Chemical composition according to EN 573-3

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Other		Al
								Each	Total	
0,30-0,60	0,10-0,30	0,10	0,10	0,35-0,60	0,05	0,15	0,10	0,05	0,15	Rest

Physical Properties (approx. 20°C)


Density	Melting range	Electrical conductivity	Thermal conductivity	Thermal expansion	Modulus of elasticity	Shear modulus
[g/cm³]	[°C]	[MS/m]	[W/(m K)]	[10 ⁻⁶ /K]	[MPa]	[MPa]
2,7	585-650	34-38	200-220	23,4	69500	26100

Cosmos profil SA
8th Km NR Larissa-Athens

Alloy data sheet
EN AW 6060

Abb. A.6: Datenblatt von AlMgSi0,5 [Quelle: CosmosAluminium]

A.1.3 Grundmaterial für offenzellige Strukturen



Primary Foundry

Alloys

Technical Data Sheet

AlSi7Mg0.3

Chemical Composition

weight-% according to EN 1676, single values indicate maximum content

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Pb	Sn	Ti	Others	
6.5-7.5	0.15	0.03	0.10	0.30-0.45	-	-	0.07	-	-	0.10-0.18	Each	Total
											0.03	0.10

Physical Properties

typical values

Density	Young's modulus	Lin. expansion	Thermal conductivity	Electrical conductivity	Solidification
[g/cm³]	[GPa]	coeff. 20-200°C	[W/(mK)]	[m/(Ωmm²)]	range
		[10⁻⁶/K]			[°C]
268.00	75	22	150-180	23-28	625-555

Abb. A.7: Datenblatt von AlSi7Mg0,3 [Quelle: HYDRO]

ГОСТ 1583 - 93													
Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Zr	B	Pb	Be	Mg	Zn	Sn	Примесей
до 0.3	7 - 8	до 0.1	0.08 - 0.15	90.37 - 92.67	до 0.1	до 0.15	до 0.1	до 0.03	до 0.1	0.25 - 0.4	до 0.2	до 0.005	всего 0.6
Твердость АК7пч , Отливки ГОСТ 1583-93										НВ 10 ⁻¹ = 45 - 70 МПа			
Физические свойства материала АК7пч .													
T	E 10 ⁻⁵	α 10 ⁶		l		r		C			R 10 ⁹		
Град	МПа	1/Град		Вт/(м-град)		кг/м ³		Дж/(кг-град)			Ом·м		
20	0.7					2660					45.7		
100		21.8		155				880					

Abb. A.8: Datenblatt von АК7П4 [Quelle: Composite Materials]

A.2 Strukturanalyse

A.2.1 Bestimmung der Porendurchmesser von Hohlkugelstrukturen

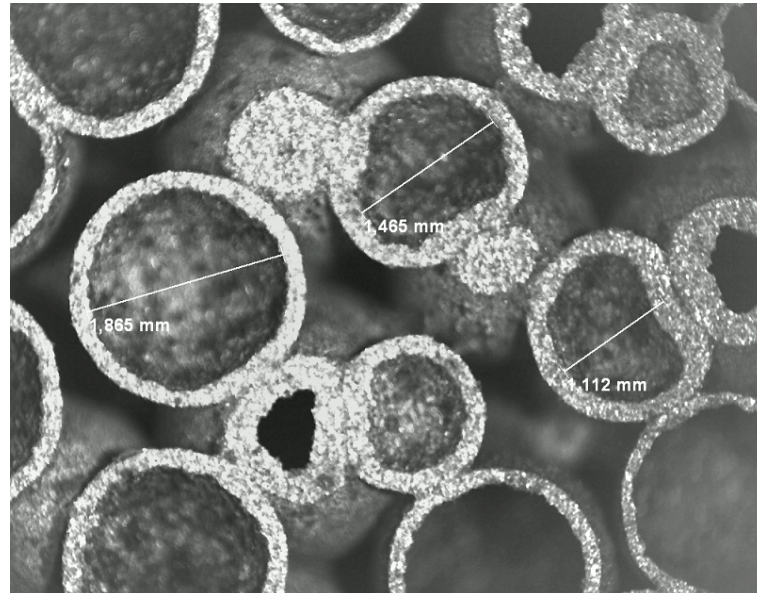


Abb. A.9: Hohlkugelstruktur aus Eisen (IFAM) mit $E = 81\%$, $d_{por} = 1,6 \text{ mm}$ (IWW, TU BAF)

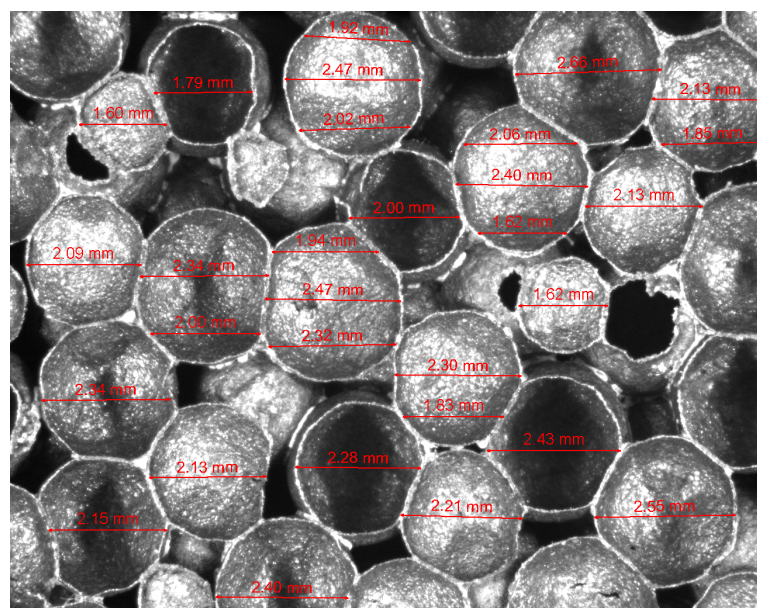


Abb. A.10: Hohlkugelstruktur aus Eisen (IFAM) mit $E = 93\%$, $d_{por} = 2,5 \text{ mm}$ (IWW, TU BAF)

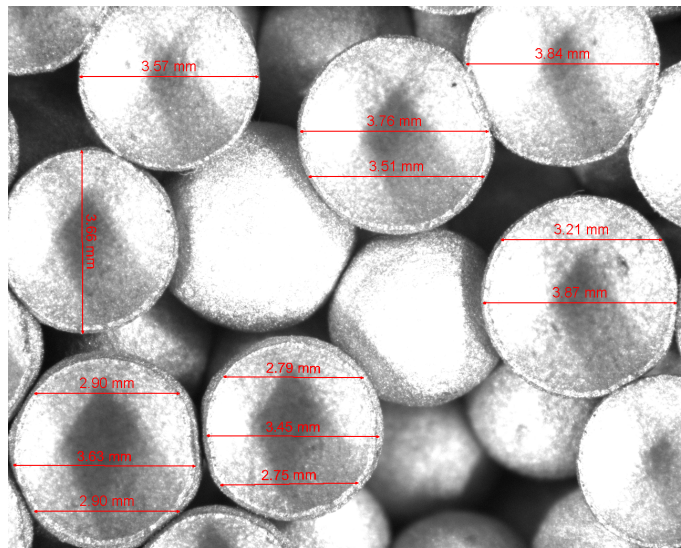


Abb. A.11: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 (IFAM) mit $E = 93\%$, $d_{por} = 3,8$ mm (IWW, TU BAF)

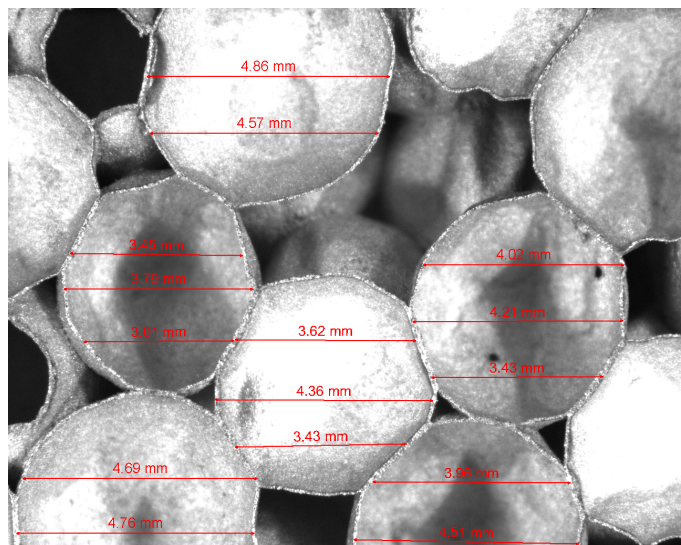


Abb. A.12: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 (IFAM) mit $E = 95\%$, $d_{por} = 4,6$ mm (IWW, TU BAF)

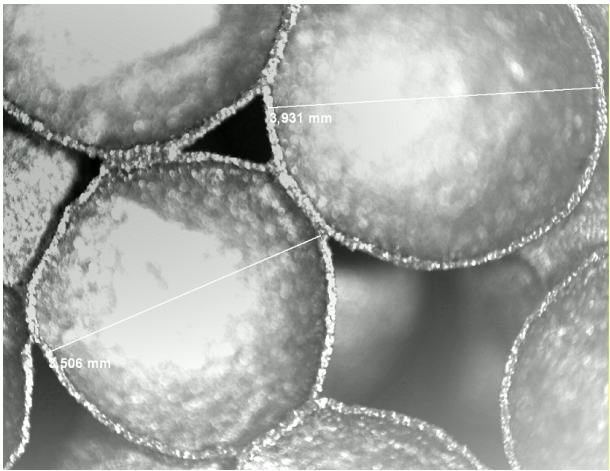
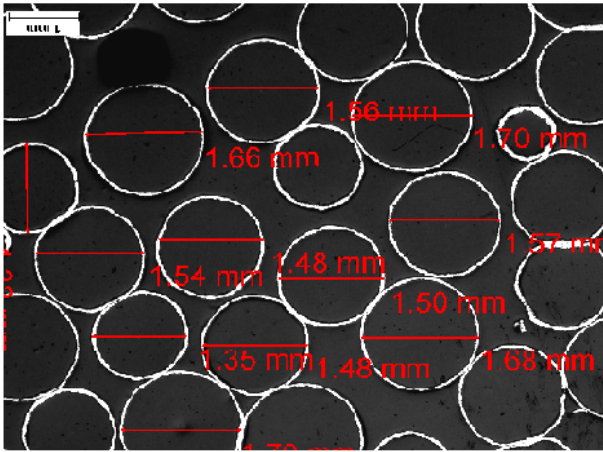


Abb. A.13: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4767 (IFAM) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 3,7$ mm (IWW, TU BAF)



Statistische Parameter								
Merkmal	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stand.abw.	Schiefe	Median	10% Quantil	90% Quantil
Länge [mm]	1,32	1,7	1,54	0,12	-0,09	1,56	1,35	1,7

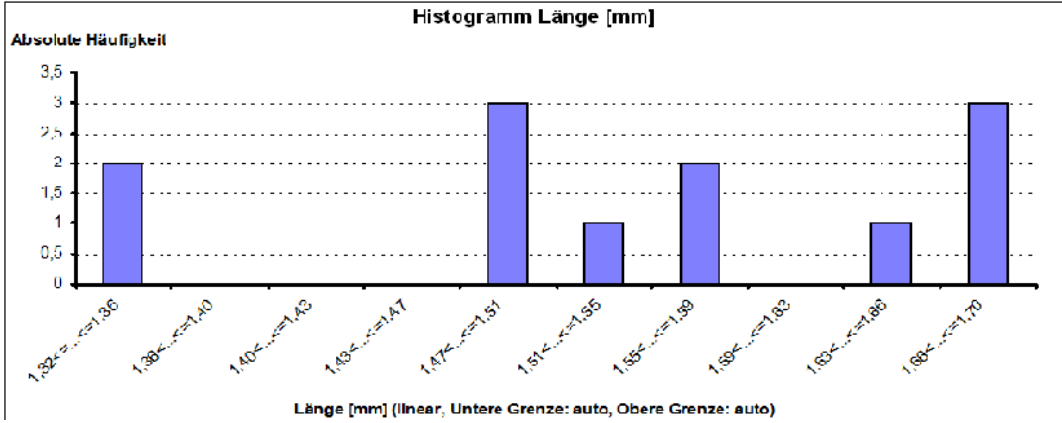


Abb. A.14: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4404 (IFAM) mit $E = 94\%$, $d_{por} = 1,5$ mm (IWW, TU BAF)

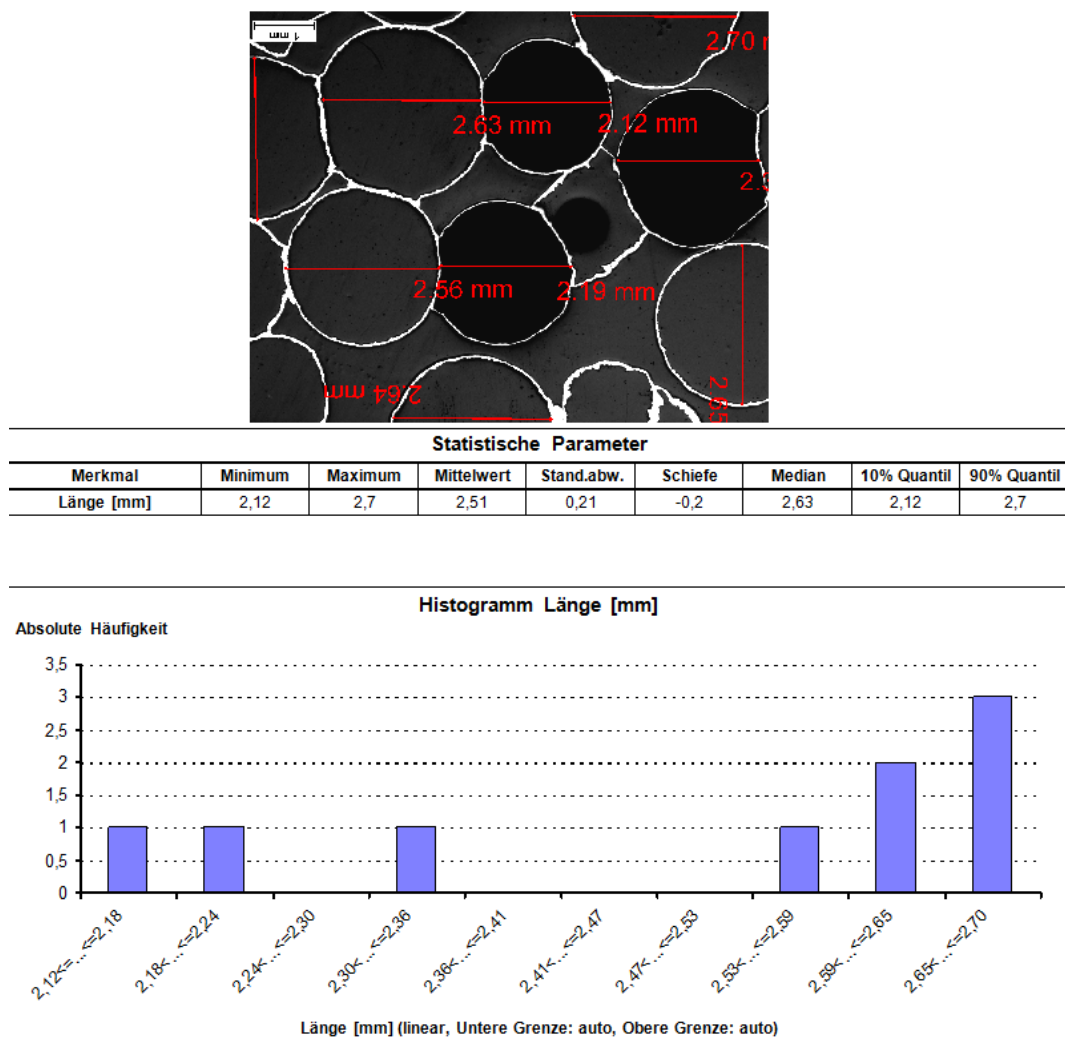


Abb. A.15: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4401 (IFAM) mit $E = 95\%$, $d_{por} = 2,5$ mm (IWW, TU BAF)

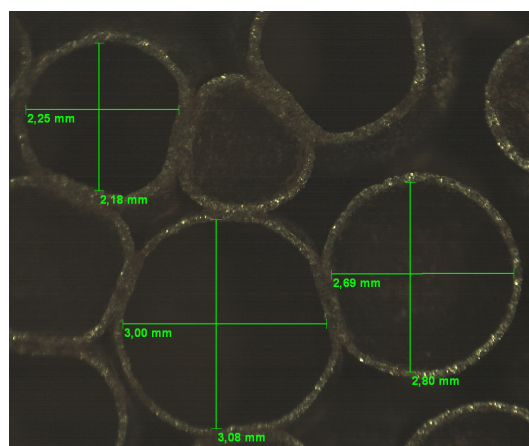


Abb. A.16: Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 89\%$, $d_{por} = 3,1$ mm (IWTT, TU BAF)

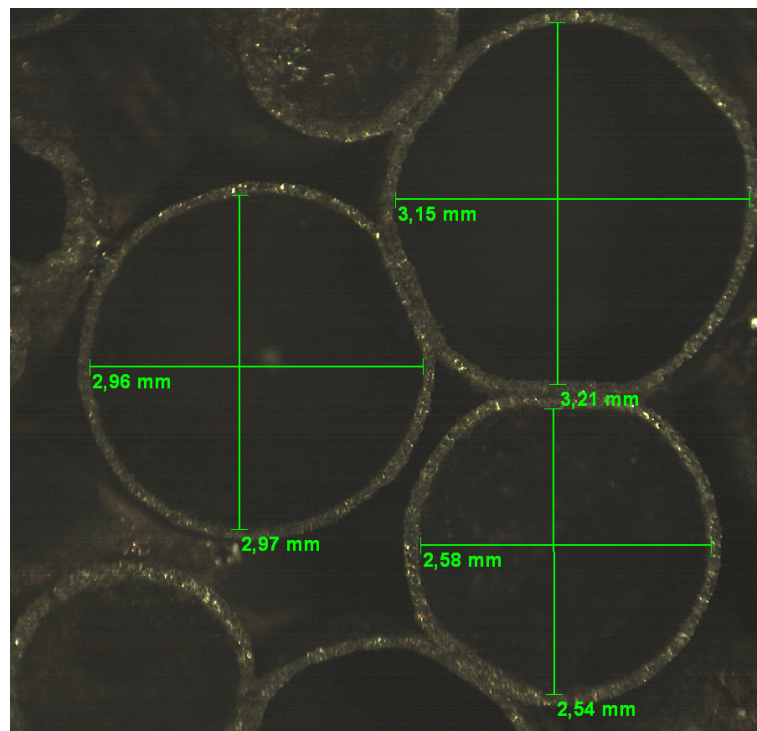


Abb. A.17: Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 2,9$ mm (IWTT, TU BAF)

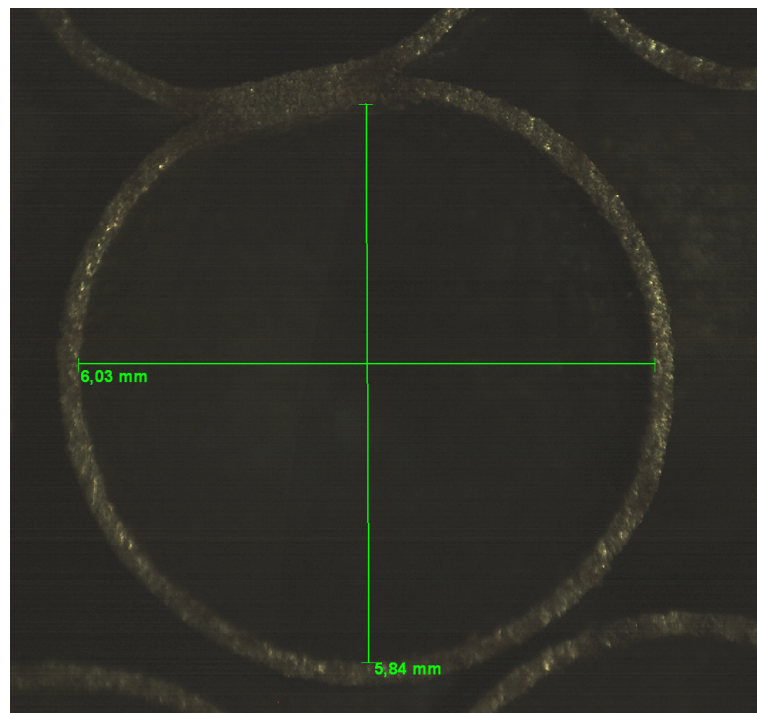
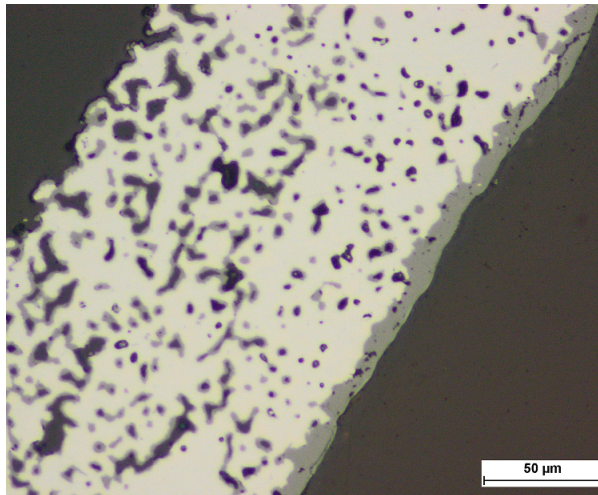


Abb. A.18: Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 5,9$ mm (IWTT, TU BAF)

A.2.2 Bestimmung der sekundären Porosität

Diese Untersuchungen wurden am IWW der TU Bergakademie durchgeführt.

Hohlkugelstrukturen



(a) $E = 81\%$, $d_{por} = 1,6 \text{ mm}$

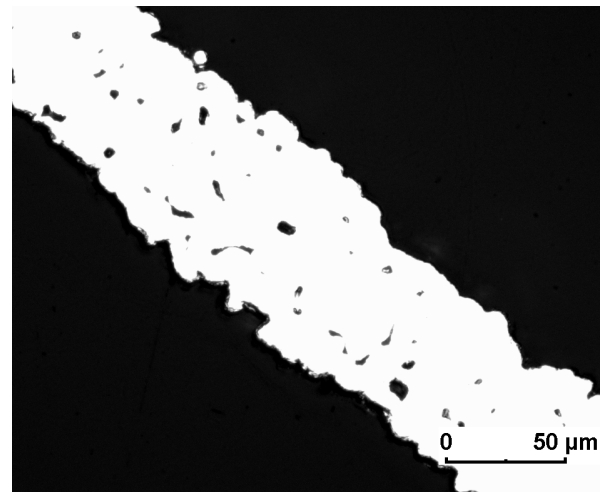


(b) $E = 93\%$, $d_{por} = 2,5 \text{ mm}$

Abb. A.19: Hohlkugelstrukturen aus Eisen (IFAM)

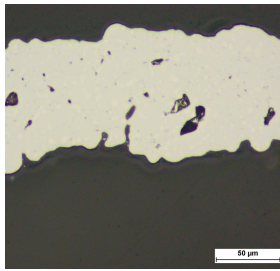


(a) $E = 93\%$, $d_{por} = 3,8 \text{ mm}$

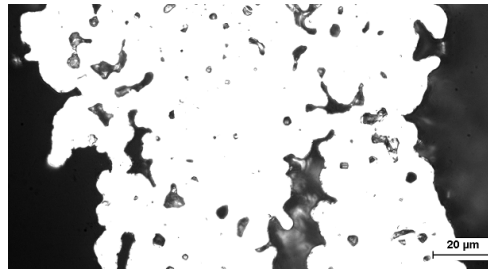


(b) $E = 95\%$, $d_{por} = 4,6 \text{ mm}$

Abb. A.20: Hohlkugelstrukturen aus Stahl 1.4841 (IFAM)

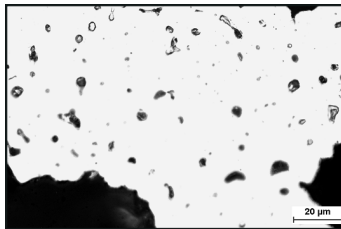


(a) Stahl 1.4767 mit
 $E = 90\%$, $d_{por} = 3,7 \text{ mm}$

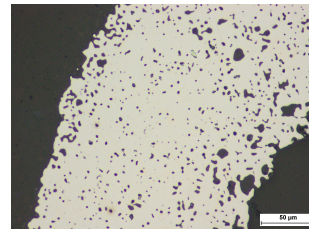


(b) Stahl 1.4404 mit
 $E = 94\%$, $d_{por} = 1,5 \text{ mm}$

Abb. A.21: Hohlkugelstrukturen (IFAM)



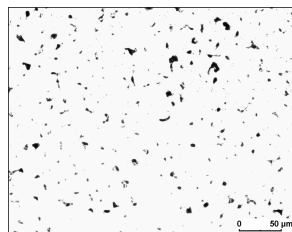
(a) Stahl 1.4401 (IFAM) mit
 $E = 95\%$, $d_{por} = 2,5 \text{ mm}$



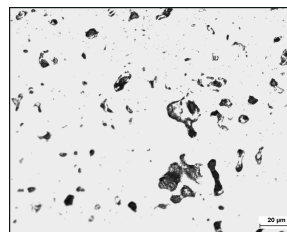
(b) Eisen (HO) mit
 $E = 94\%$, $d_{por} = 1,5 \text{ mm}$

Abb. A.22: Hohlkugelstrukturen

Offenzellige Strukturen



(a) $d_{por} = 4,5 \text{ mm}$

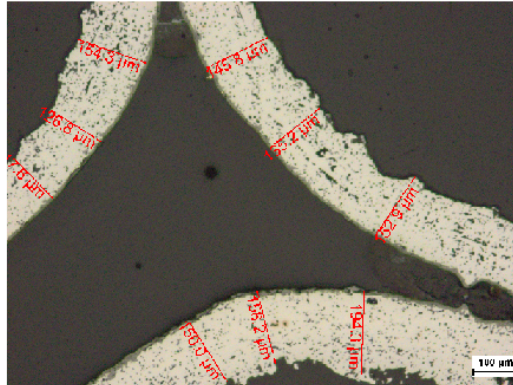


(b) $d_{por} = 7,2 \text{ mm}$

Abb. A.23: Offenzellige Strukturen aus FeCrAl (HO)

A.2.3 Bestimmung der Stegdicke

Hohlkugelstrukturen



Statistische Parameter								
Merkmal	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stand.abw.	Schiefe	Median	10% Quantil	90% Quantil
Länge [μm]	117,57	194,26	148,34	20,7	18,46	149,97	117,57	194,26

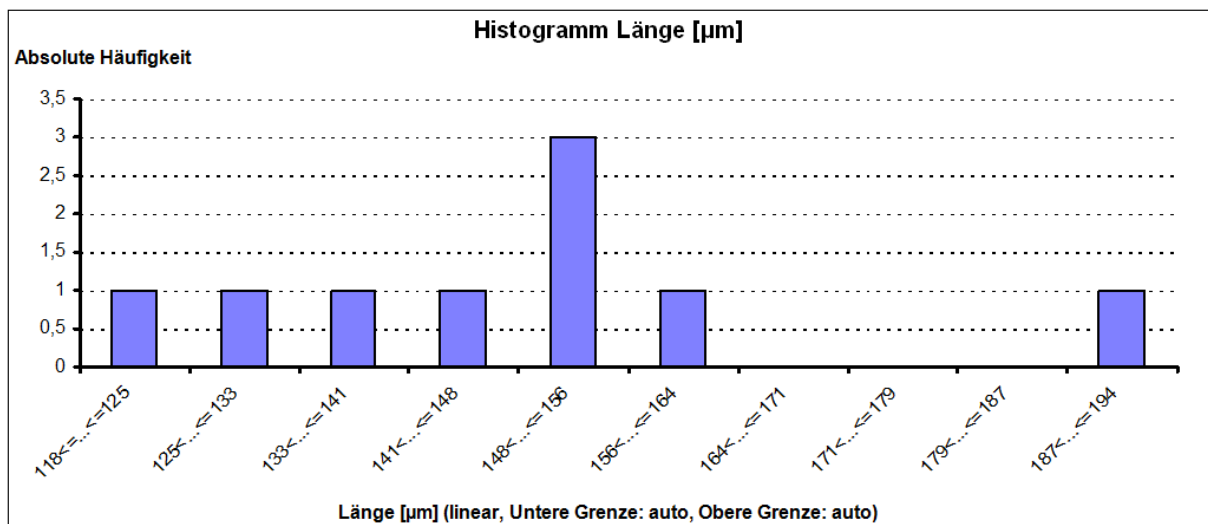
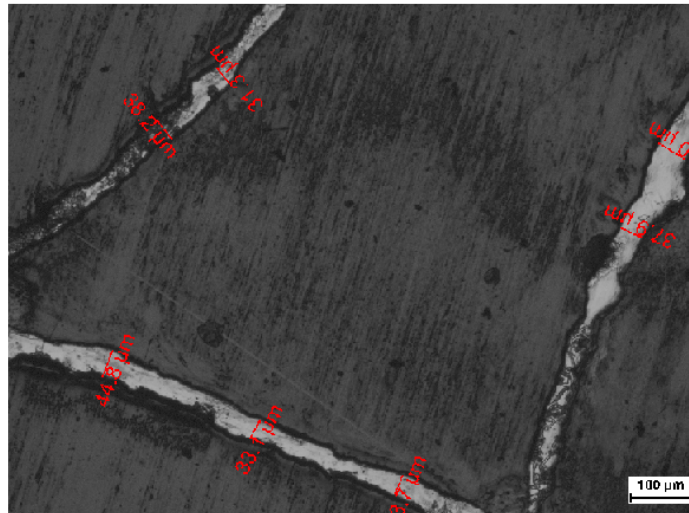


Abb. A.24: Hohlkugelstruktur aus Eisen (IFAM) mit $E = 81\%$, $d_{por} = 1,6 \text{ mm}$ (IWW, TU BAF)



Statistische Parameter								
Merkmal	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stand.abw.	Schiefe	Median	10% Quantil	90% Quantil
Länge [µm]	31,33	50,04	38,44	6,29	5,56	37,91	31,33	50,04

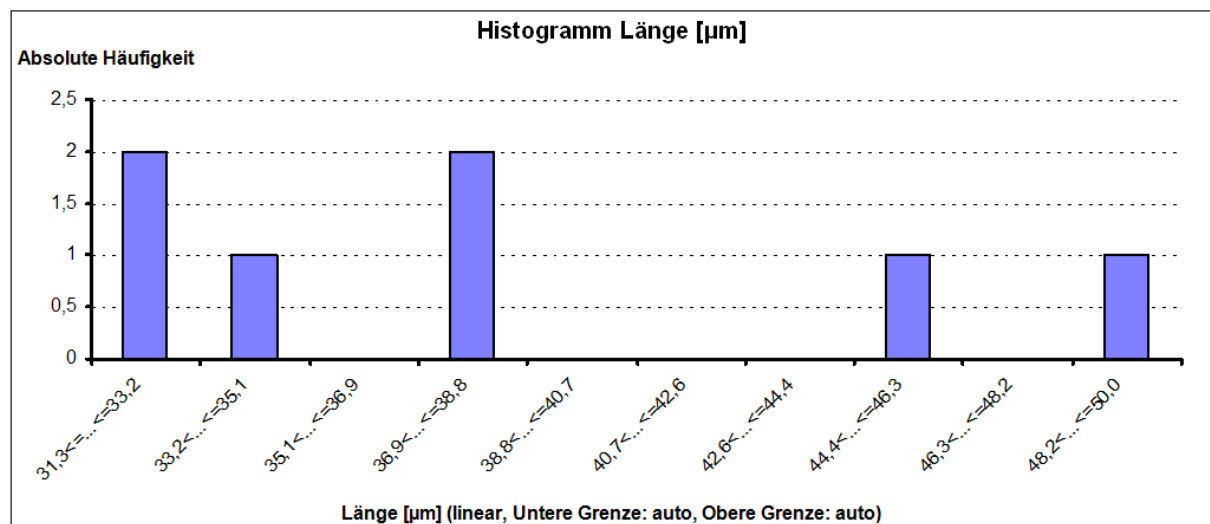
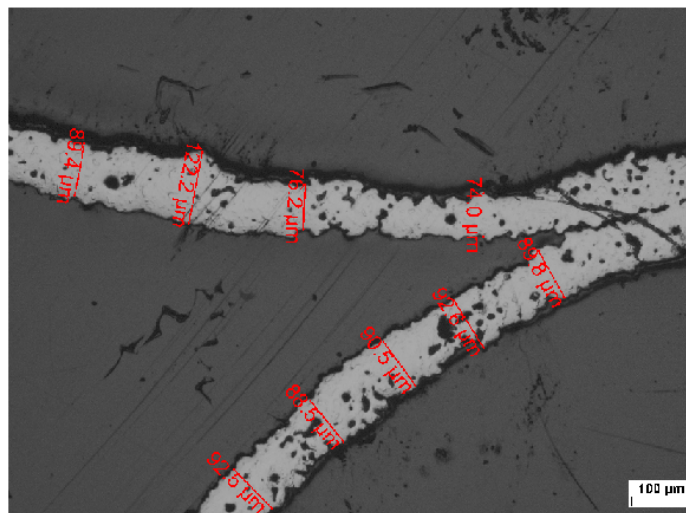


Abb. A.25: Hohlkugelstruktur aus Eisen (IFAM) mit $E = 93\%$, $d_{por} = 2,5$ mm (IWW, TU BAF)



Statistische Parameter								
Merkmal	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stand.abw.	Schiefe	Median	10% Quantil	90% Quantil
Länge [µm]	74,01	122,23	90,64	12,89	13,85	89,81	74,01	122,23

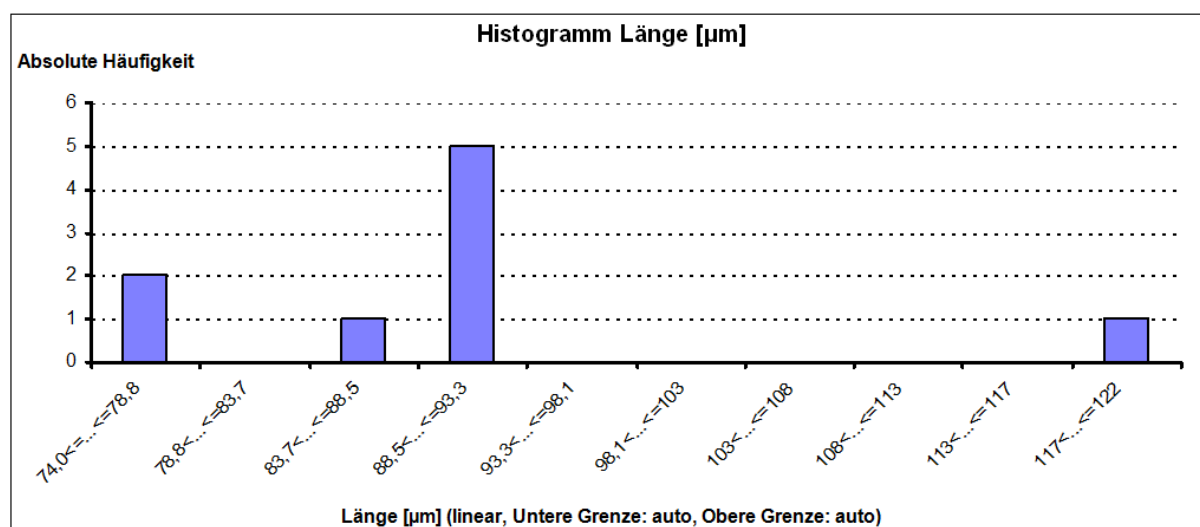
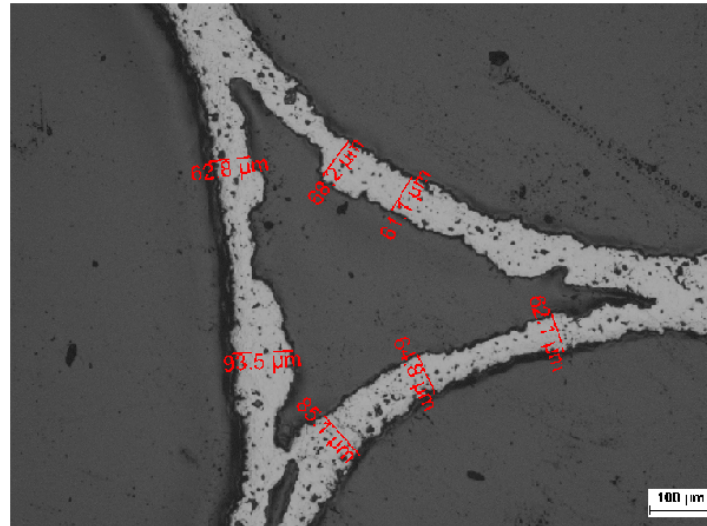


Abb. A.26: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 (IFAM) mit $E = 93\%$, $d_{por} = 3,8 \text{ mm}$ (IWW, TU BAF)



Statistische Parameter								
Merkmal	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stand.abw.	Schiefe	Median	10% Quantil	90% Quantil
Länge [µm]	61,07	93,54	71,08	11,94	11,8	64,8	61,07	93,54

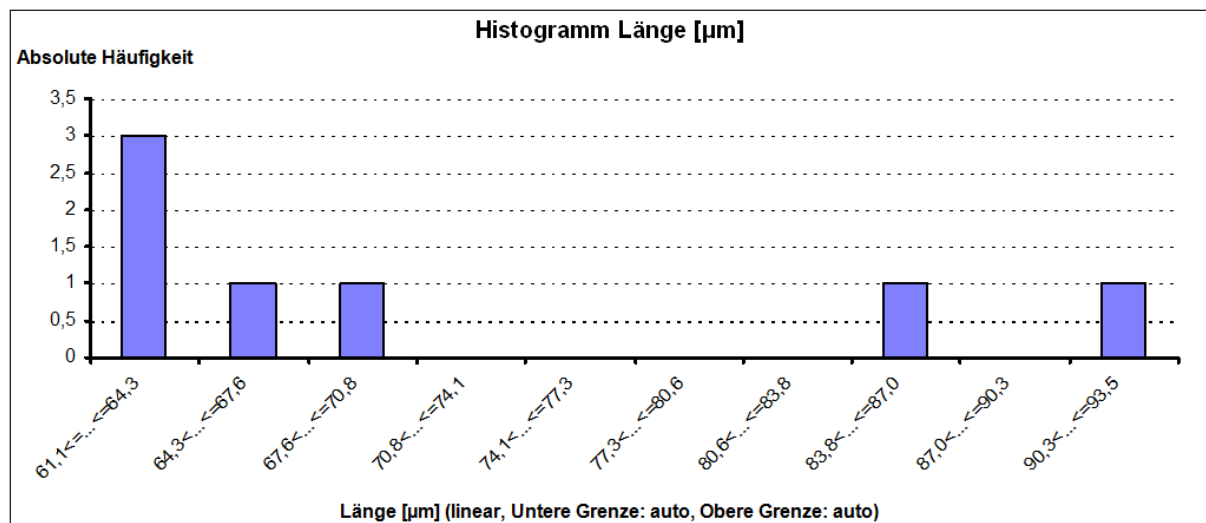
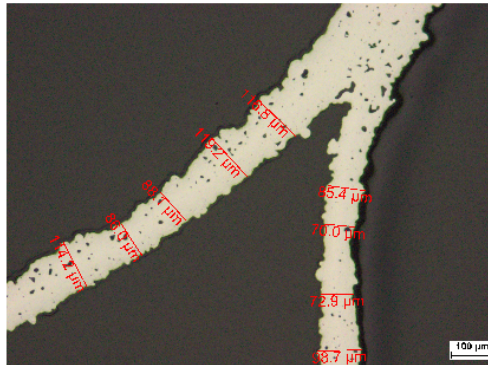


Abb. A.27: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4841 (IFAM) mit $E = 95\%$, $d_{por} = 4,6$ mm (IWW, TU BAF)



Statistische Parameter								
Merkmal	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stand.abw.	Schiefe	Median	10% Quantil	90% Quantil
Länge [µm]	70,02	119,2	94,6	17,56	9,08	88,1	70,02	119,2

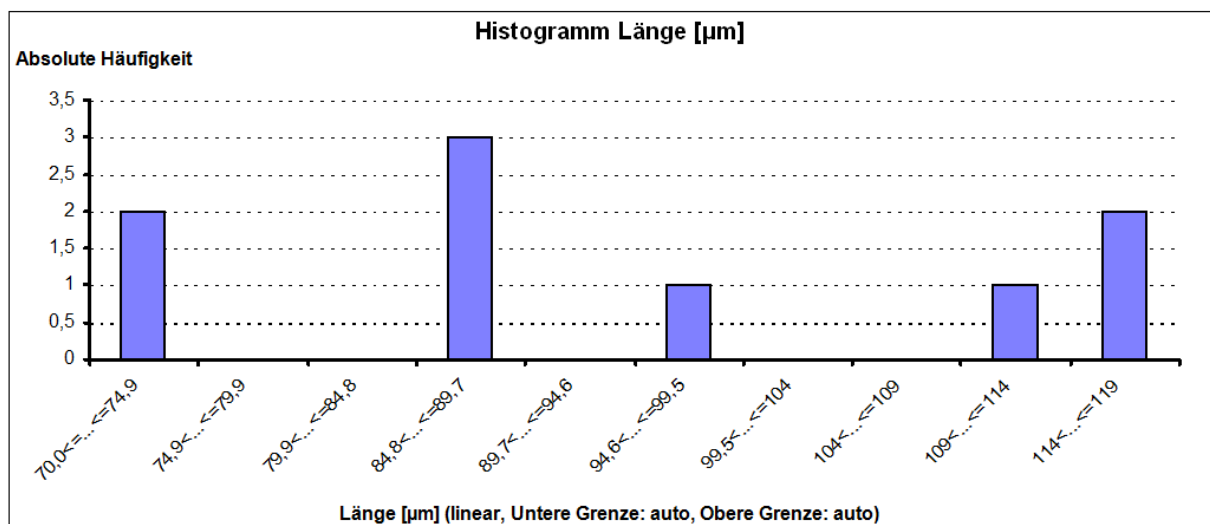
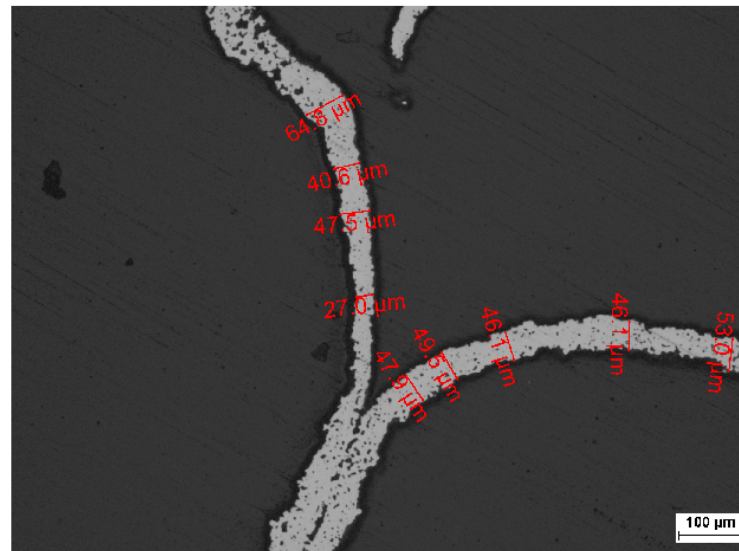


Abb. A.28: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4767 (IFAM) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 3,7$ mm (IWW, TU BAF)



Statistische Parameter								
Merkmal	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stand.abw.	Schiefe	Median	10% Quantil	90% Quantil
Länge [µm]	27,01	64,8	46,95	9,44	-6,31	47,5	27,01	64,8

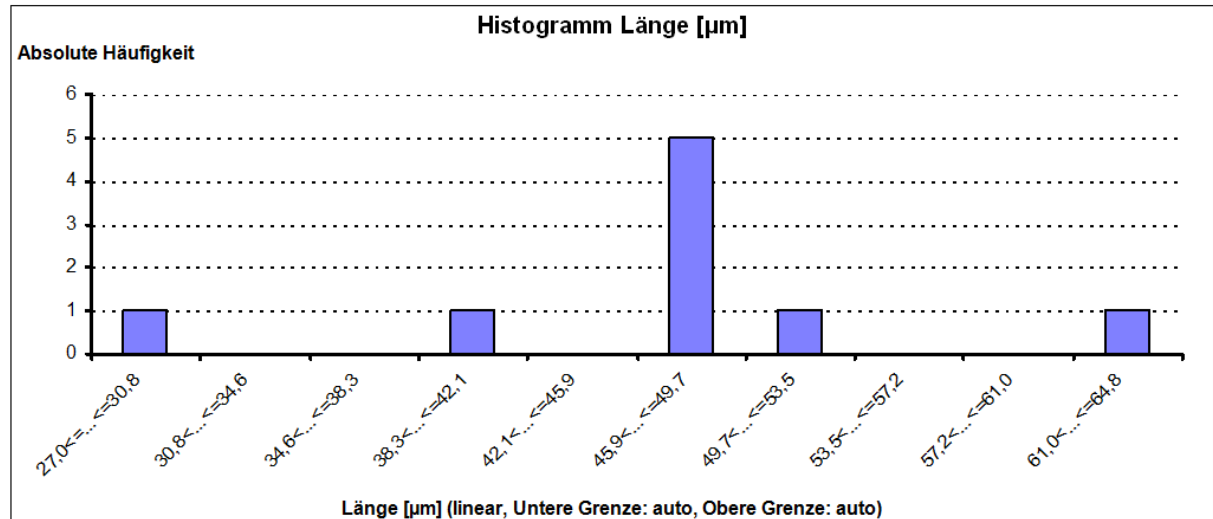
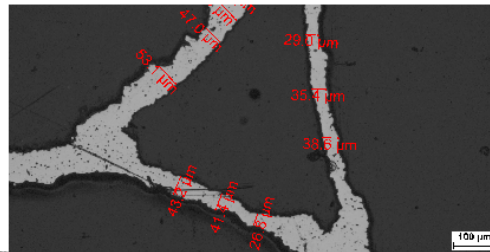


Abb. A.29: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4404 (IFAM) mit $E = 94\%$, $d_{por} = 1,5$ mm (IWW, TU BAF)



Statistische Parameter								
Merkmal	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stand.abw.	Schiefe	Median	10% Quantil	90% Quantil
Länge [μm]	26,82	84,28	44,56	14,95	16,92	41,43	29,04	53,18

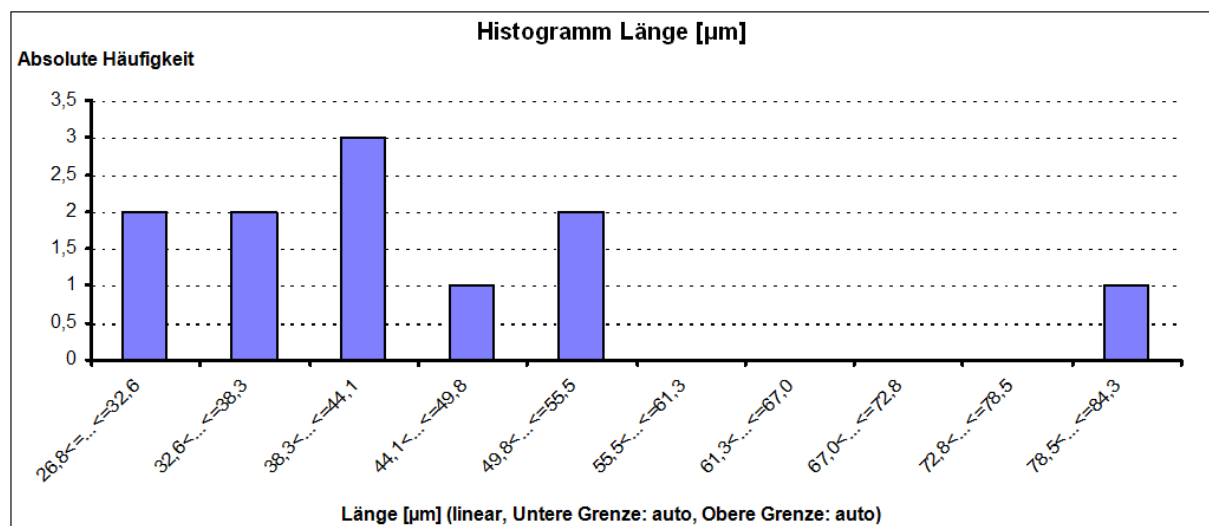


Abb. A.30: Hohlkugelstruktur aus Stahl 1.4401 (IFAM) mit $E = 95\%$, $d_{por} = 2,5$ mm (IWW, TU BAF)

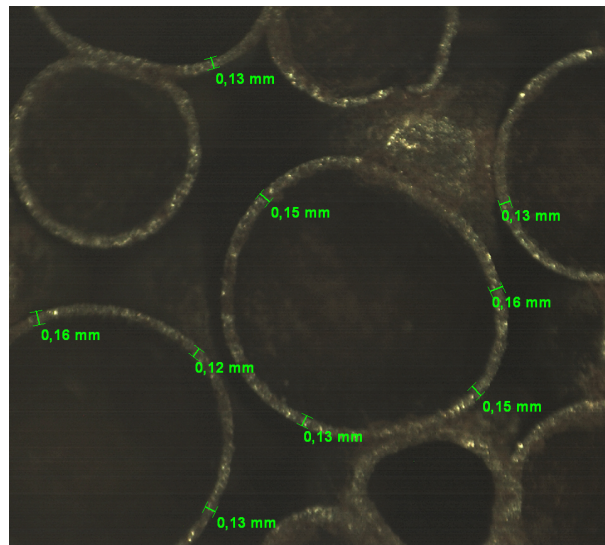


Abb. A.31: Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 89\%$, $d_{por} = 3,1$ mm (IWTT, TU BAF)

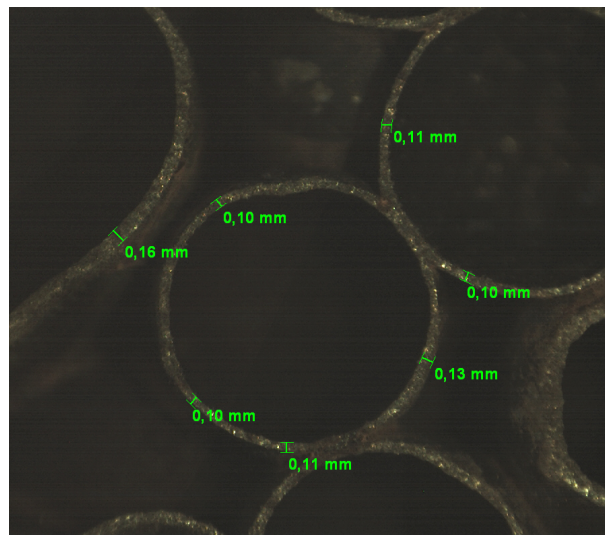


Abb. A.32: Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 2,9$ mm (IWTT, TU BAF)

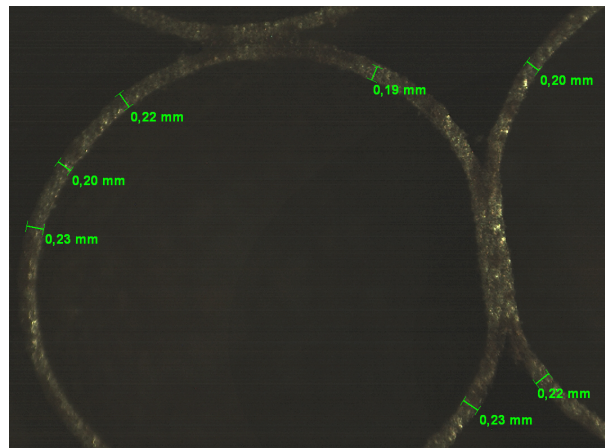


Abb. A.33: Hohlkugelstruktur aus Eisen (HO) mit $E = 90\%$, $d_{por} = 5,9$ mm (IWTT, TU BAF)

Offenzellige Strukturen

Parameter	Mittelw.	Median	Stabw.	Min.	Max.
äquivalenter Kreisdurchmesser: [μm]	1248	1246	155	950	1996
Rundheit	0,84	0,86	0,08	0,44	0,95
Länge-Breite-Verhältnis		1,18			
Stegbreite* [μm]	253	244	66		
Anzahl ausgewerteter Poren:	181				
Stegkontaktfläche:	16	%			
offene Porosität:	84	%			
entspricht ppi:	36				

Abb. A.34: Offenzellige Struktur aus FeCrAl (HO) mit $d_{por} = 1,9$ mm (IKTS)

Parameter	Mittelw.	Median	Stabw.	Min.	Max.
äquivalenter Kreisdurchmesser: [μm]	2200	2171	322	1693	4856
Rundheit	0,83	0,85	0,08	0,39	0,95
Länge-Breite-Verhältnis		1,21			
Stegbreite* [μm]	426	411	133		
Anzahl ausgewerteter Poren:	252				
Stegkontaktfläche:	16	%			
offene Porosität:	84	%			
entspricht ppi:	22				

Abb. A.35: Offenzellige Struktur aus FeCrAl (HO) mit $d_{por} = 3,6 \text{ mm}$ (IKTS)

Parameter	Mittelw.	Median	Stabw.	Min.	Max.
äquivalenter Kreisdurchmesser: [μm]	3152	3148	432	2395	4243
Rundheit	0,85	0,87	0,06	0,56	0,95
Länge-Breite-Verhältnis		1,13			
Stegbreite* [μm]	497	496	131		
Anzahl ausgewerteter Poren:	112				
Stegkontaktfläche:	12	%			
offene Porosität:	88	%			
entspricht ppi:	15				

Abb. A.36: Offenzellige Struktur aus FeCrAl (HO) mit $d_{por} = 7,2 \text{ mm}$ (IKTS)

Parameter	Mittelw.	Median	Stabw.	Min.	Max.
äquivalenter Kreisdurchmesser: [μm]	4831	4801	707	3931	7968
Rundheit	0,85	0,87	0,07	0,65	0,92
Länge-Breite-Verhältnis		1,17			
Stegbreite* [μm]	820	801	130		
Anzahl ausgewerteter Poren:	46				
Stegkontaktfläche:	10	%			
offene Porosität:	90	%			
entspricht ppi:	8,5				

Abb. A.37: Offenzellige Struktur aus AlSi7Mg0,3 (MP) mit $d_{por} = 2,5 \text{ mm}$ (IKTS)

A.2.4 Bestimmung der Stegfläche

Hohlkugelstrukturen

Material	E (%)	dpor (mm)	Anteil Stegfläche (%)	Hersteller
Fe	81	1,6	38	IFAM
Fe	93	2,5	12	
Stahl 1.4841	93	3,8	12	
Stahl 1.4841	95	4,6	11	
Stahl 1.4767	90	3,7	15	
Stahl 1.4404	94	1,5	14	
Stahl 1.4401	95	2,5	8	
Fe	89	3,1	17	HO
Fe	90	2,9	12	
Fe	90	5,9	14	

Abb. A.38: Hohlkugelstrukturen (IFAM, HO)(IKTS)

Offenzellige Strukturen

Parameter	Mittelw.	Median	Stabw.	Min.	Max.
äquivalenter Kreisdurchmesser: [μm]	556	521	361	31	2112
Rundheit	0,81	0,82	0,10	0,35	1,00
Länge-Breite-Verhältnis		1,40			
Anzahl ausgewerteter Poren:	1492				
Stegkontaktfläche [%]:	61				
offene Porosität [%]:	39				

Abb. A.39: Offenzellige Struktur aus AlMgSi0,5 (CM) (IKTS)

Die Bestimmung der Stegfläche der anderen offenzelligen Strukturen (HO, MP) ist in den Tabellen im Anhang A.2.3 bereits enthalten.